南极普里兹湾表层沉积硅藻及其与环境因素的关系

马瑞雯, 黄 玥*

（云南大学 地球科学学院，云南 昆明 650500）

摘 要： 基于中国第 29 次南极科学考察采集的普里兹湾及其邻近海域 22 个表层沉积样品数据和资料，分析研究区沉积硅藻组合面貌变化、主要硅藻属种的空间分布特点。共鉴定出硅藻 29 种，隶属于 12 个属，*Fragilariopsis curta* 和 *F. kerguelensis* 为优势种。*F. curta*、*F. cylindrus*、*F. ritscheri*、*F. separanda* 四种海冰硅藻种的相对百分比自湾内向深海区逐渐减少；近海冰种 *Thalassiosira antarctica* 和 *Porosira glacialis* 在普里兹环流中间区域相对百分比最高，并由环流中心向外递减；*F. kerguelensis*、*Paralia sulcata* 和 *Azpeitia tabularis* 三种硅藻的相对百分比自湾内向深海区逐渐增加。采用典范对应分析（CCA）方法对硅藻鉴定结果和环境因素之间的关系进行研究，结果表明：典范对应分析结果与主要硅藻属种生态相符合，*F. curta*、*F. separanda*、*F. cylindrus* 和 *F. ritscheri* 四种硅藻作为普里兹湾海区的低温指示种，指示温度较低的海洋环境；*P. glacialis* 和 *T. antarctica* 两种硅藻作为低盐指示种，指示盐度较低的海洋环境。在此基础上分析了海水表层温度、海水表层盐度等环境因素与表层沉积硅藻的确切关系，这为后续建立硅藻-环境转换函数，在普里兹湾定量重建这些环境因素的历史变化提供了数据支持。

关键词： 沉积物；环境因素；典范对应分析（CCA）；硅藻；普里兹湾

中图分类号： P736; P941.61 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671-6647（2024）01-0062-13

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20221013001

引用格式： 马瑞雯, 黄玥, 2024. 南极普里兹湾表层沉积硅藻及其与环境因素的关系[J]. 海洋科学进展, 42(1): 62-74. MA R W, HUANG Y, 2024. Diatoms in surface sediments of Prydz Bay, Antarctica and their relationship to environmental factors[J]. Advances in Marine Science, 42(1): 62-74.

普里兹湾是南极大陆的第三大海湾。作为南大洋的重要组成部分，它也是南大洋海洋地质、海洋地球物理、古海洋学及气候变化研究的重点区域。自 1989 年中国中山站建立，普里兹湾及其邻近海域逐步成为中国在南大洋研究的重点区域，我国已有很多学者对该区域的物理海洋学、有机地球化学、碳循环和悬浮颗粒物等进行了大量研究（高郭平等, 2013; 张凡等, 2013; 赵军等, 2014; 方建勇等, 2015）。

硅藻是一种重要的微小单细胞藻类，种类多、数量大且分布范围广泛，从两极到热带，无论是在湖泊、近岸海域还是海洋，几乎所有水域中都有它的存在（刘俊琢, 2011）。硅藻是海洋系统中重要的初级生产者（Abrantes et al, 2005），每年贡献全球初级生产力的 20% 左右（马健荣等, 2010），在南大洋中硅藻也发挥着重要的作用。硅藻具有硅质外壳，不易被溶解，能在沉积物中长期保存（王艳娜等, 2013）。硅藻对于环境具有高敏感性，受温度、盐度等环境因素的影响显著，能够对水体环境的变化做出迅速响应（丁蕾等, 2006）。不同生境的不同硅藻组合和分布特征是对具体环境特

收稿日期： 2022-10-13
资助项目： 国家自然科学基金项目（41966008）
作者简介： 马瑞雯（1999—），女，硕士研究生，主要从事海洋地质与第四纪地质方面研究. E-mail: ruiwenma@mail.ynu.edu.cn
*** 通信作者：** 黄 玥（1980—），男，讲师，博士，硕士生导师，主要从事海洋地质与第四纪地质方面研究. E-mail: yuehuang@ynu.edu.cn

（高 峻 编辑）

点最直接的反映，可指示海洋环境的变化(商志文等, 2012)。研究表层沉积硅藻分布规律及其与沉积环境之间的关系，建立硅藻与目标环境因素之间的转换函数，对于重建海洋古地理环境、古气候具有重要意义(程广芬等, 1991)。

作为古环境研究的重要指示物种，南极普里兹湾海域沉积硅藻得到广泛关注，现有研究结果主要集中在 3 个方面：①在普里兹湾现存的硅藻属种及其分布特征研究中，明确表层沉积物中硅藻组合有 4 类，对应沿海、陆架、达恩利角和深海四大区域(Taylor et al, 1997)。优势种硅藻为 *F. curta*；67°S 以南的普里兹湾湾内以 *F. kerguelensis*、*F. curta*、*Asteromphalus hookeri* 等南极特有种类和常见种类为主，67°S 以北的深海区主要为南极常见种 *Pseudo-nitzschia lineola*(Zhu et al, 2003; 孙军等, 2003)。主要硅藻属种呈现出湾内高、湾外低、陆坡和深海区最低的分布特征，最大值出现在湾内普里兹环流中心区域(于培松等, 2012)。这些研究揭示了普里兹湾海域存在的主要硅藻属种、数量及其空间分布特征，为我们对该区域沉积硅藻的进一步研究提供了详实的数据与资料。②依据硅藻的生态特征划分海洋环境的差异研究中，利用除趋势对应分析初步探讨环境因素与硅藻组合面貌的关系，并将表层沉积硅藻分成了开放水域种、近海冰种、海冰种三种组合(唐灵刚等, 2015)。对沉积硅藻与环境间关系的初步分析，为半定量古环境重建提供了依据。类似除趋势对应分析这样的间接多元分析方法，对环境因素的解读仅依赖于已知的硅藻生态。由于研究区实测环境因素数据匮乏，且硅藻对环境因素变化极为敏感，微小的变化可能会引起硅藻组合较大的改变，故分析结果存在较大的不确定性。③在普里兹湾大时间尺度的半定量重建研究中，利用沉积物柱状样硅藻组合进行分带并据此将 15 ka 来的气候划分为 8 个阶段，对晚更新世以来的气候变化初步展开半定量重建(吴时国等, 1998)。对第四纪硅藻组合面貌(Taylor et al, 2002)进行分析并解释了第四纪沉积(Taylor et al, 2003)；利用沉积物中硅藻数据初步重建了普里兹湾冰川环境(Barbara et al, 2010)；还半定量重建了百万年大时间尺度上的古气候和古环境变化(Villa et al, 2008)。这些半定量重建结果，是后续将进行的更精确的定量重建的重要依据。

进行更为精确的定量重建，必须通过直接多元分析方法找寻硅藻组合与各环境因素间的确切关系，进而建立硅藻-环境转换函数，最终通过转换函数计算出各环境因素定量数值。目前中国对普里兹湾环境因素与硅藻组合面貌直接关系研究开展较少，因此，我们选取中国第 29 次南极科学考察中普里兹湾及其邻近海域 22 个表层沉积物样品，开展硅藻鉴定工作。鉴定结果结合对应站位的 CTD 数据集及海冰数据，尝试利用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)这一直接多元分析方法，找出对研究区硅藻分布影响较大的环境因素以及对应的硅藻指示种，明确主要海洋环境因素对表层硅藻组合的影响。这为后续建立硅藻-环境转换函数，最终完成普里兹湾古环境定量重建提供必要的数据支撑。

1　概　况

普里兹湾位于东南极，呈倒三角形，是南大洋中深嵌入南极大陆的一个海湾，是仅次于威德尔海和罗斯海的南极第三大海湾。普里兹湾南部与兰伯特冰川末端的埃默里冰架紧密相邻，向北延伸，东侧为伊丽莎白公主地，西侧为麦克•罗伯逊地。湾口发育有 2 个浅滩，东北侧为四女士浅滩、西北侧则是弗拉姆浅滩；在 2 个浅滩之间有 1 个深约 600 m 的水道，是海湾内物质与外海进行物质和能量交换的重要通道(王丽艳等, 2018)。普里兹湾海区的环流较为简单，主要由北部海区的南极绕极流(ACC)、湾内的普里兹环流(PG)以及南极陆坡流(ASC)和南极沿岸流(CoC)组成(乐肯堂, 1995; 史久新等, 2002)。自西向东的南极绕极流(ACC)与南极陆坡自东向西的南极陆坡流(ASC)间形成了一个巨大的气旋涡流，也就是南极辐散带(AD)(Smith et al, 1984)(图 1)。普里兹湾海域海冰以季节

性海冰为主，存在较大的季节及年际变化(郑少军等, 2011)。在冬季(3 月至 11 月)普里兹湾被厚厚的海冰覆盖，最远可延伸到 58°S 附近；夏季(12 月至次年 2 月)海冰开始逐渐融化，海冰密集度减少，到 2 月大部分地区形成开阔海域，但仍有部分地区被活动的浮冰覆盖(图 1)，硅藻等浮游生物繁盛(史久新等, 1999; 李春雷等, 2021)。

2 材料与方法

2.1 样品采集及处理

22 个站位的表层沉积物硅藻样品取自于南极普里兹湾及其邻近海域，由中国第 29 次南极科学考察队于 2013 年 1 至 3 月乘坐“雪龙号”极地考察船分别使用箱式取样器、多管取样器和柱状取样器取得。样品存放于船上专门设置的 4 ℃ 地质样品库中，后存放于云南大学地球科学学院水环境实验室 4 ℃ 的冰柜中，共包括 18 份箱式样、3 份多管样和 1 份柱状样(站位见图 1)。是至今为止中国在普里兹湾开展的规模最大的表层和柱状样沉积样品采集工作。取样品顶部的 0～2 cm 作为表层沉积物样品。2013 年 12 月在云南大学地球科学学院水环境实验室按照以下步骤对硅藻样品进行处理和制片(Håkansson et al, 1984)：①取 3～5 g 样品烘干后放入试管中，加入质量分数为 10% 的稀盐酸(购于国药集团化学试剂有限公司)搅拌均匀去除钙质，静置 12～24 h 后用蒸馏水清洗 3 次；②加入质量分数为 30% 的双氧水(购于国药集团化学试剂有限公司)去除有机质，待样品与双氧水初步反应后置于恒温水浴锅中(70 ℃)加热 1～2 h，完全反应后从水浴锅中取出样品再用蒸馏水清洗 3 次，洗净的样品离心去水；③加入乙醇搅拌均匀后用玻璃棒将硅藻悬浮液均匀涂在盖玻片上，用 Naphrax 胶(dn=1.73)固定制片。

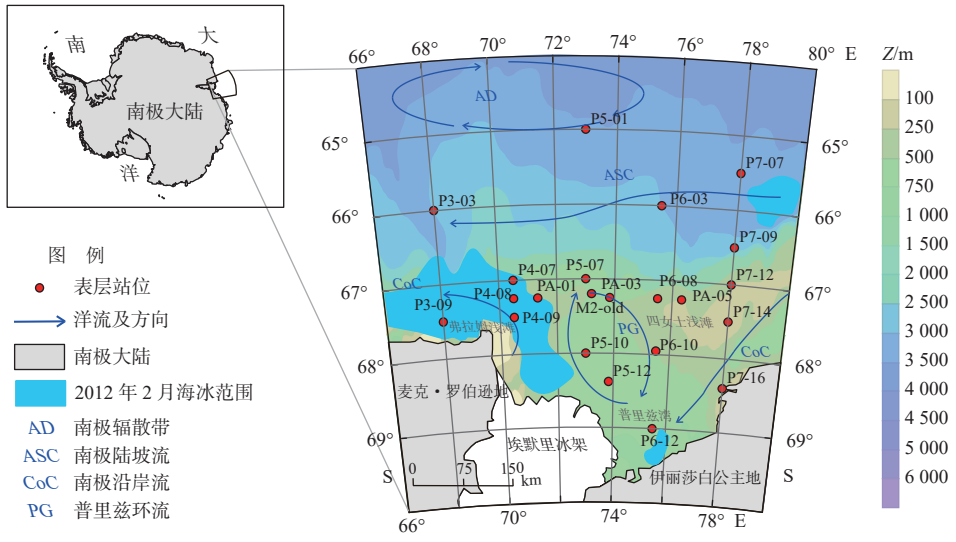

图 1 普里兹湾概况与表层沉积物硅藻样品取样站位(改自唐灵刚, 2015; 王丽艳等, 2018)

Fig. 1 Schematic diagram of Prydz Bay and surface sediment diatom sampling stations (reminded from Tang et al, 2015; Wang et al, 2018)

最后在 1 000 倍徕卡(Leica)油镜下进行硅藻的鉴定与数量统计：对于不完整的硅藻，壳体若是超过一半则视为整体参与计数，每个样品统计硅藻壳面 300 个以上；大部分硅藻鉴定到种，少数到属，鉴定参照相关资料(Jousé, 1968; Medlin et al, 1990; Hasle et al, 1997)。

2.2　环境数据

硅藻的生长和分布受温度和盐度影响较大。普里兹湾沿岸常年被冰雪覆盖，陆地边缘物质难以进入湾内，也没有营养盐含量高的径流注入，故湾内营养盐含量不高(陈际雨等, 2017)，对硅藻分布影响不大，故我们没有选择营养盐这一环境因素。此外，由于南极具有常年被海冰覆盖这一区域特殊性，在温盐等数据的基础上加入海冰覆盖天数这一因素。

我们从中国南极科学考察 CTD 数据集(林丽娜等, 2017)中选取了 2013 年南极普里兹湾 22 个站位(水深 152 ～3 339 m)在水深 12 m 处(由于海冰覆盖，CTD 数据集可获取数据最浅深度为 12 m，将其作为海水表层)的温度(℃)和盐度。同时选取了密度(kg/m^3)和各站位所对应的水深(m)。

海冰覆盖天数(Cavalieri et al, 2013)源于美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)提供的逐日海冰密集度数据集。是由 Nimbus-7 卫星携带的扫描式多通道微波辐射计(Scanning Multichannel Microwave Radiometer, SMMR)和美国国防气象卫星项目(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)系列卫星搭载的特种微波成像仪(Special Sensor Microwave/Imager, SSM/I)及专用传感器微波成像仪/探测仪(Special Sensor Microwave Imager Sounder, SSMIS)提供的亮温数据反演得到。通过对遥感影像目视识别得到了 22 个站位在 2012 年 366 d 的海冰覆盖情况，统计各站位该年被海冰覆盖的天数(表 1)。

表 1　表层站位环境因素数据

Table 1　Environmental factors of surface sediment at sampling stations

站 位	*Z*/m	海水表层温度/℃	海水表层盐度	海水表层密度/(kg·m^{-3})	海冰覆盖天数/d
M2-old	533	−0.276 7	33.942 8	27.266 3	284
P3-03	2 653	−0.563 5	33.998 8	27.324 4	282
P3-09	239	−1.361 6	33.873 8	27.252 9	298
P4-07	294	−1.447 8	34.119 2	27.454 8	326
P4-08	152	−1.508 4	34.046 4	27.397 5	328
P4-09	280	−1.348 0	33.918 5	27.288 7	330
P5-01	3 339	0.738 3	33.703 2	27.018 8	251
P5-07	493	−0.085 8	33.897 7	27.220 6	294
P5-10	608	−0.063 3	33.973 8	27.281 0	269
P5-12	634	−0.961 0	33.842 9	27.214 1	255
P6-03	2 937	0.394 4	33.754 5	27.080 0	265
P6-08	367	−0.005 4	33.803 8	27.140 8	258
P6-10	467	−0.289 5	33.914 6	27.244 1	243
P6-12	683	−0.582 6	33.032 0	26.543 1	314
P7-07	3 202	0.364 2	33.731 1	27.062 8	274
P7-09	1 062	0.001 8	33.685 9	27.045 3	303
P7-12	209	−0.504 7	33.656 1	27.044 7	279
P7-14	303	−0.646 4	33.611 9	27.014 8	250
P7-16	541	−1.044 0	33.366 2	26.830 7	244
PA-01	507	−0.625 1	34.020 9	27.344 9	321
PA-03	462	−0.383 1	33.981 8	27.302 7	269
PA-05	343	−0.172 0	33.818 1	27.160 5	266

2.3 典范对应分析

典范对应分析(CCA)是一种基于对应分析发展而来的排序方法，将对应分析与多元回归分析相结合，每一步计算均与环境因素进行回归，属于多元直接梯度分析。它能够同时将站点、种属数据和环境变量显示在一个低维空间中(Briks et al, 1995)。我们尝试采用该方法对表层沉积物硅藻组合面貌与对应环境数据进行分析，以期获取它们之间的关系。

3 结果与讨论

3.1 表层沉积硅藻组合面貌

22 个表层沉积物中共鉴定出硅藻 29 种，隶属于 12 个属(表 2)。这些硅藻基本都是极地特有种，少数几种为世界范围广布种。与前人鉴定结果对比验证，大多为普里兹湾海区的常见种，基本不存在异地搬运的情况。*Fragilariopsis* 属是研究区内种类最多、相对百分比最高的属，*F. curta* 和 *F. kerguelensis* 为研究区内的绝对优势种。*F. curta* 是南极海域较丰富的硅藻种之一，在全部站位中均有存在，相对百分比最高可达 66.34%；*F. kerguelensis* 是南大洋的优势种之一，在南大洋生态系统中十分重要(孙军等, 2003)，22 个站位中均有存在，相对百分比最高可达 68.69%。此外，*F. ritscheri*、*T. antarctica* 是研究区的优势种，所有站位中均有其存在，相对百分比最高分别可达 16.34% 和 22.33%；*F. cylindrus*、*F. separanda* 也是普里兹湾及其邻海的常见种，相对百分比最高均超过 10%。而 *F. sublinearis*、*F. rhombica* 则为次优势种，在大多数站位均有存在，相对百分比在 5%～＜10%。值得一提的是，*A. tabularis*、*P. glacialis* 和 *P. sulcata* 三种硅藻在各站位的相对百分比虽然小，但对生态环境具有指示意义，其重要性不可忽略。具有重要环境指示意义的部分硅藻图版见图 2。

表 2 普里兹湾表层沉积主要硅藻属种表

Table 2 List of main diatom species in the surface sediments of Prydz Bay

硅藻属种	硅藻属种
Actinocyclus actinochilus (Ehrenberg) Simonsen, 1982	*Fragilariopsis sublinearis* (Van Heurck) Heiden and Kolbe, 1943
Actinocyclus oculatus Jousé, 1968*	*Neodenticula seminae* (R. Simonsen and T. Kanaya) F. Akiba and Y. Yanagisawa, 1986
Actinocyclus spiritus T. P. Watkins, 1986	
Actinocyclus exiguus G. Fryxell and Semina, 1981	*Paralia sulcata* (Ehrenberg) Cleve, 1873
Asteromphalus hookerii Ehrenberg, 1844	*Porosira glacialis* (Grunow) Jörgensen, 1905
Asteromphalus hyalinus Karsten, 1905	*Pseudo-nitzschia delicatissima* (Cleve) Heiden, 1928
Asteromphalus parvulus Karsten, 1905	*Porosira pseudodenticulata* (Hustedt) Jousé, 1962
Azpeitia tabularis (Grunow) G. Fryxell and P. A. Sims, 1986	*Rhizosolenia crassa* Schimper, 1905
Cocconeis pinnata (Hustedt) Cleve-Euler, 1934	*Rhizosolenia curvata* Zacharias, 1905
Fragilariopsis curta (Van Heurck) Hustedt, 1958	*Rhizosolenia hebetata* (Hensen) Margalef, 1951
Fragilariopsis cylindrus (Grunow) Krieger, 1954	*Thalassiosira antarctica* Comber, 1896
Fragilariopsis kerguelensis (O'Meara) Hustedt, 1952	*Thalassiosira eccentrica* (Ehrenberg) Cleve, 1904
Fragilariopsis rhombica (O'Meara) Hustedt, 1952	*Thalassiosira gracilis* (Karsten) Hustedt, 1958
Fragilariopsis ritscheri Hustedt, 1958	*Thalassiosira lentiginosa* (Janisch) Fryxell, 1977
Fragilariopsis separanda Hustedt, 1958	*Thalassiothrix antarctica* A. Schimper ex G. Karsten, 1905

注：*该种详见文献 Jousé(1968)，其他种详见文献 Hasle et al(1997)。

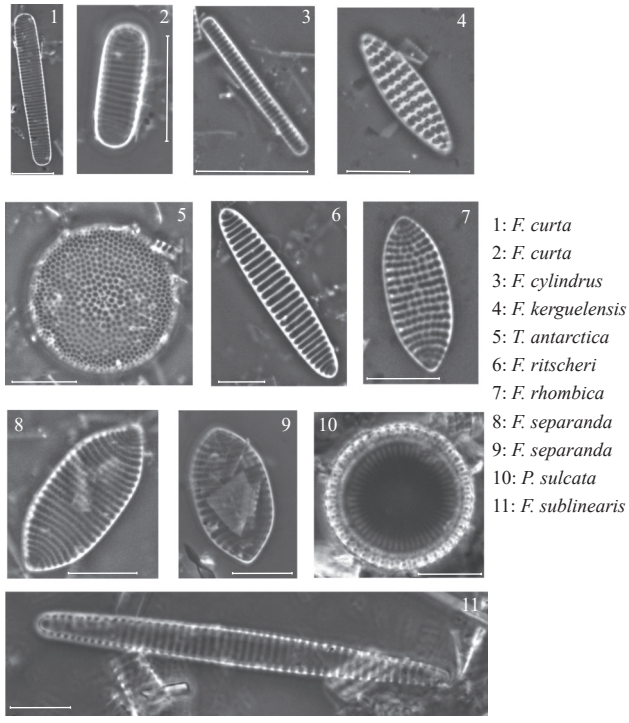

图 2　普里兹湾表层沉积物中部分主要硅藻属种图版(比例尺为 10 μm)

Fig. 2　Plates of some major diatom species in the surface sediments of Prydz Bay (the scales is 10 μm)

3.2　主要硅藻属种空间分布特征

利用 ArcGIS 10.2 软件(Environmental Systems Research Institute, Inc., 2014)对普里兹湾 9 种主要硅藻属种的相对百分比进行普通克里金插值，得到了 *F. curta*、*F. cylindrus*、*F. ritscheri* 和 *F. separanda* 四种硅藻的相对百分比空间分布(图 3a～图 3d)；*T. antarctica* 和 *P. glacialis* 相对百分比之和的空间分布(图 3e)以及 *F. kerguelensis*、*P. sulcata* 和*A. tabularis* 三种硅藻相对百分比之和的空间分布(图 3f)。

普里兹湾内水深较浅，约为 400 m。普里兹湾上层水体的主要来源是西向的沿岸流(CoC)，其来源于西风漂流的冷水团，这也使得普里兹湾内的陆架水温度要比外洋的低。普里兹湾以北有一个水深 1 000～3 000 m 的大陆坡，位于 66°30'S 附近，这是普里兹湾与北部开阔大洋的分界，大陆坡以北为水深超过 3 000 m 的深海区。随着纬度增加，海水表层温度降低，海冰覆盖天数增加，海冰硅藻种的相对百分比亦随之增加。*F. curta*、*F. cylindrus*、*F. ritscheri* 和 *F. separanda* 四种硅藻在 67°S 以南靠近普里兹湾的区域相对百分比较高，而在深海区相对百分比较低。*F. curta* 作为研究区内的绝对优势种，其相对百分比自湾内向深海区递减，在站位 P3-03、P5-01、P6-03 和 P7-07 附近的相对百分比小于 15%，说明该种硅藻更适宜在水深较浅、温度较低的环境中生存。在麦克•罗伯逊地前缘区域海冰覆盖天数较多，且受到自东向西流动的南极沿岸流(CoC)影响，将普里兹湾内的冷水带出，使得该区域海水表层温度较低，因而 *F. ritscheri*、*F. separanda* 这些海冰种的相对百分比均较高。

这 4 种海冰种的分布特征大体相似，但有一定差异，受到影响因素也有所不同。*F. ritscheri* 与其他 3 种海冰种均在普里兹湾内区域相对百分比较高，但其存在 2 个明显的高值中心：一个位于普里兹环流(PG)中心，受其影响；另一个则在四女士浅滩附近，水深较浅，因此 *F. ritscheri* 的分布可能受到环流和水深的影响。*F. curta* 的相对百分比等值线在普里兹湾内呈现出“M”型，左侧在弗拉姆浅滩附近向深海区突出，右侧在四女士浅滩附近向外突出。这可能是受南极表层水影响，冬季南

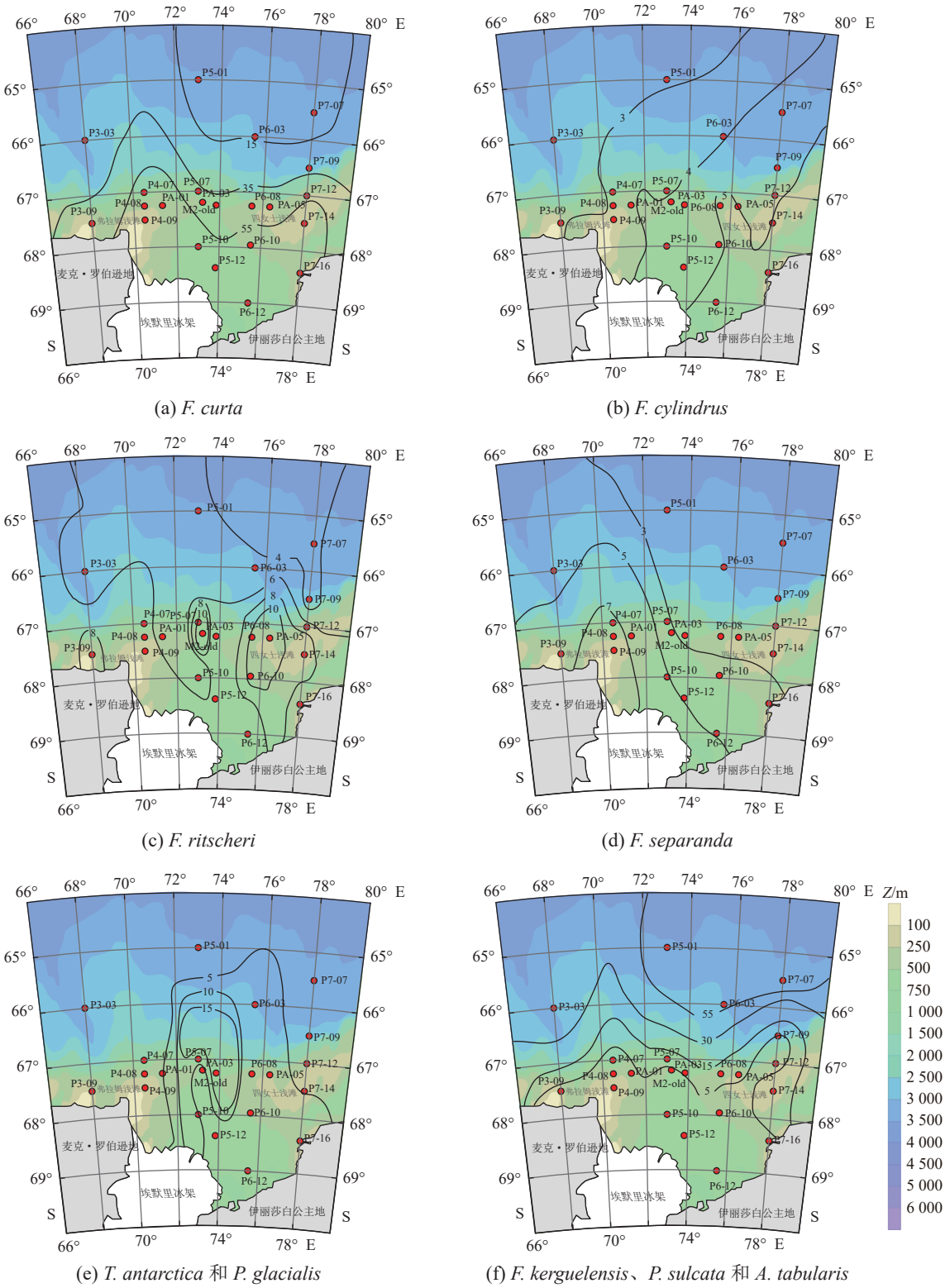

图 3 普里兹湾主要硅藻属种相对百分比(%)空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of relative percentage (%) of some main diatom species of Prydz Bay

极表层水向湾外扩展(乐肯堂, 1995), 导致海冰种向开阔大洋扩散, 从而使得湾内相对百分比较高而深海区相对百分比较低。此外, 浅滩处在夏季仍被未融化的浮冰覆盖, 这使得附近的海水温度低, 从而 *F. curta* 的相对百分比较高、等值线向深海突出。*F. separanda* 在西侧靠近弗拉姆浅滩的相对百分比较高, 朝东北方向逐渐减少, 而 *F. cylindrus* 则在东侧四女士浅滩和普里兹湾内的相对百分比较高, 朝西北方向逐渐减少。这二者可能共同受到了南极沿岸流(CoC)的影响。较冷的 CoC 从东侧的西冰架附近流入, 较低的海水温度使得 *F. cylindrus* 的相对百分比较高, 然后其继续向西沿埃默里冰架前缘从西北方向在达恩利角附近流出, 进而又影响到 *F. separanda* 的相对百分比。但 *F. separanda* 的高值区与 *F. cylindrus* 的相比水深较浅, 这可能是水深的差异带来的不同。

T. antarctica 和 *P. glacialis* 在研究区的分布范围不大, 其相对百分比在以 PA-03、P5-07 站位为中心的区域最高, 达到 15% 以上。主要分布于弗拉姆浅滩和四女士浅滩之间, 受到了普里兹环流(PG)的影响。在环流中间的相对百分比最高, 然后由环流中心向外递减, 在大部分站位的相对百分比均小于 5%。*F. kerguelensis*、*P. sulcata* 和 *A. tabularis* 三种硅藻的相对百分比自湾内向深海区逐渐增加, 在 67°S 以南区域其相对百分比在 5% 以下, 到深海区其相对百分比骤增至 55% 以上。深海区的海洋环境特征: 受相对温暖的南极绕极流(ACC)影响, 海水表层温度相对较高, 且水深较深、海冰覆盖天数较少, 说明此类硅藻适应于相对较高的海洋温度或对海水温度的适应范围较广。

3.3　CCA 排序结果及主要硅藻生态

利用 Canoco 5.0 软件(Ter braak et al, 2012)将 22 个表层沉积硅藻数据与对应站位的水深、海水表层温度、海水表层盐度、海水表层密度和海冰覆盖天数进行 CCA 分析。CCA 排序结果表明, 前 2 个排序轴的特征值分别为 0.524 6 和 0.053 5, 累计解释了 54.41% 的物种变化信息和 94.00% 的环境变率, CCA 排序结果能够较好地反映普里兹湾表层沉积硅藻群落与环境因素之间的关系。CCA 排序图中, 矢量箭头代表不同的环境因素, 箭头长度越长表示该环境因素对硅藻组合面貌的影响程度越大, 海水表层温度的影响程度最大, 水深其次(图 4)。

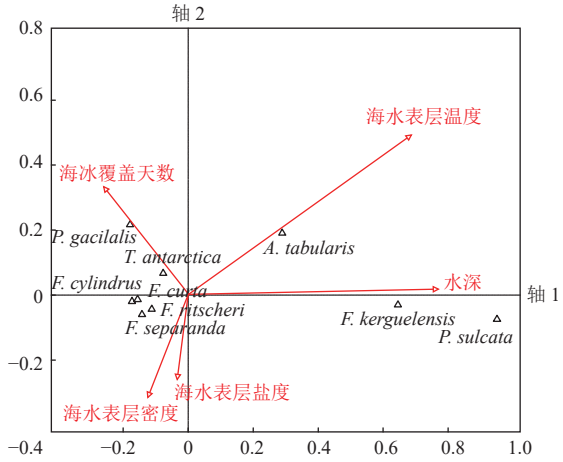

图 4　主要表层沉积硅藻与环境因素的 CCA 排序图

Fig. 4　CCA ordination diagram of major surface sediment diatoms and environmental factors

CCA 排序图中以矢量箭头表示具体的环境因素。硅藻属种与该环境因素的关系, 体现在代表各个硅藻属种的点在矢量箭头上的投影点到原点的正负距离, 距离大小代表了各种硅藻受该环境因素影响程度的高低。如海水表层温度这一环境因素, 在其矢量箭头正方向上分布的硅藻, 指示生活在海水表层温度相对较高区域或者对海水温度的适应范围较广; 而分布在矢量箭头负方向的几种硅藻则指示生活在温度较低的区域。因此 CCA 排序图可以表示出硅藻属种与环境因素间的确切关系。

海水表层温度矢量箭头正方向的 3 种硅藻为 *P. sulcata*、*F. kerguelensis* 和 *A. tabularis*, 靠近原点附近分布的主要是 *T. antarctica* 和 *P. glacialis*, 而在矢量负方向分布的硅藻主要是 *F. separanda*、*F. cylindrus*、*F. curta* 和 *F. ritscheri*。从其生态来看, *P. sulcata* 是世界性广布种, 从赤道至极地的海域均有出现, 它广泛分布在温带半咸水区的底栖或浮游硅藻群落中(Gebühr et al, 2009), 在水温超过 7 ℃ 的海域较为常见(Zong, 1997), 该硅藻的相对丰度与温度呈显著正相关(樊鑫, 2018); *F.*

kerguelensis 生活在相对温暖的海洋中(吴聪等, 2018)，适应温度范围较广，被认为是相对广温种；*A. tabularis* 是一种生活在亚南极水域的硅藻(Jousé, 1968)，在南大洋的表层沉积物中也发现了它的存在，其最大丰度与较高的海水表层温度密切相关(Romero et al, 2005)。靠近原点的 2 种硅藻主要是近海冰种或极地种：*P. glacialis* 属于极地硅藻种，常出现在高纬度水温较低的水域中，但不同于海冰硅藻(冉莉华等, 2012)；*T. antarctica* 是极地硅藻种，在水温和盐度都低的南极沿岸或者靠近海冰的水域广泛分布(Hasle et al, 1968; 史久新等, 1999; 唐灵刚等, 2015)，其生存环境的水温比典型海冰种高，是近海冰种但不属于海冰种(冉莉华, 2008)。海水表层温度矢量负方向的几种硅藻都被认为与海冰相关，可以归为海冰种(吴聪等, 2018)。其中，*F. curta* 是南极海域最丰富的拟脆杆藻属硅藻，也是南大洋特有种，被认为是相对喜冷种。*F. cylindrus* 是极地海域常见的浮游海冰种硅藻，多分布在海水温度较低的高纬度海域或海冰中(Zong et al, 1997)，非常耐冷，常作为海冰指示种。随海水温度降低、海冰覆盖增加，该硅藻的相对百分比随之增加，表明其对寒冷环境有较好的适应性(冉莉华等, 2012)。*F. ritscheri* 生活在南极冷水海域，在−1.60 ℃～−0.09 ℃ 温度范围内均有发现(Cefarelli et al, 2010)。此外，*F. separanda* 也是南极海域的常见种，且多分布于冷水海域，被认为与海冰有关(Armand et al, 2005)。

以上硅藻对于温度的适应性与它们在海水表层温度矢量上的分布相符合。可以将 *F. curta*、*F. cylindrus*、*F. ritscheri* 和 *F. separanda* 四种硅藻作为低温指示种，用于代表南极普里兹湾海域温度较低的海洋环境。同时，*Fragilariopsis* 属的这些海冰种和近海冰种 *T. antarctica*、*P. glacialis* 均处于海冰覆盖天数矢量箭头的正方向，代表了较长的海冰覆盖时间。这些海冰指示种可以为后续建立硅藻-海冰转换函数提供基准数据，进而为定量重建遥感影像缺乏时期的古海冰变化提供可能。

对于海水表层盐度这一环境变量，分布在矢量负方向上的有 *P. glacialis* 和 *T. antarctica* 两种硅藻。*T. antarctica* 主要分布在盐度较低的南极沿岸(Hasle et al, 1968)；*P. glacialis* 主要生活在高海冰密集度、低盐度的水域中(Pike et al, 2009)，它们均能较好地代表盐度较低的海洋环境。在水深环境变量的矢量箭头上，*F. kerguelensis* 在其正方向上的投影距离较大，此硅藻常被作为开阔海域的指示种，用于代表离岸较远、水体较深的开阔大洋环境(陆钧, 1997)；生活在偏深水域(Jousé, 1968)的 *A. tabularis* 也在该箭头上有较大投影距离。相反，在其负方向的 *T. antarctica* 主要分布在南极沿岸水深较浅的区域(唐灵刚等, 2015)。此外，由于南极海冰边缘的平均纬度通常在 9 月到达最北端，2 月时又退缩到最南端(刘玥等, 2021)，海冰主要覆盖在靠近南极大陆的边缘区域。*F. curta*、*F. cylindrus* 等与海冰密切相关的硅藻种主要分布在水深较浅、离岸近的海冰覆盖区域，因此在水深矢量箭头上它们主要分布在负方向。

4 结 论

分析 2013 年第 29 次中国南极科学考察普里兹湾及其邻近海域 22 个表层站位的沉积硅藻鉴定结果和对应站位的环境数据的关系。采用典范对应分析方法(CCA)对表层沉积硅藻属种与环境变量之间的相关关系进行了研究，得到如下结果。

1)从表层沉积物硅藻样品中共鉴定出硅藻 29 种，隶属于 12 个属。其中 *Fragilariopsis* 属是研究区内种类最多、相对百分比最高的属，*F. curta* 和 *F. kerguelensis* 为绝对优势种，*F. ritscheri*、*T. antarctica* 为优势种，*F. sublinearis*、*F. rhombica* 则为次优势种。*F. cylindrus*、*F. separanda* 是普里兹湾及其邻海的常见种；*A. tabularis*、*P. glacialis* 和 *P. sulcata* 的相对百分比虽小却具有重要生态指示意义。

2)主要硅藻属种的空间分布特点：*F. curta*、*F. cylindrus*、*F. ritscheri*、*F. separanda* 四种海冰硅藻种的相对百分比自湾内向深海区逐渐减少；近海冰种 *T. antarctica* 和 *P. glacialis* 在普里兹环流中间区

域相对百分比较高，然后由环流中心向外递减；*F. kerguelensis*、*P. sulcata* 和 *A. tabularis* 三种硅藻的相对百分比自湾内向深海区逐渐增加。

3)海水表层温度是影响研究区硅藻分布的最大环境变量，对比研究区主要硅藻生态，发现它们对温度的适应性与它们在海水表层温度矢量上的分布相符合。故可以将 *F. curta*、*F. cylindrus*、*F. ritscheri* 和 *F. separanda* 四种硅藻作为低温指示种，用于指示南极普里兹湾海域温度较低的海洋环境。对于海水表层盐度这一重要的环境变量，则可以将 *P. glacialis* 和 *T. antarctica* 两种硅藻作为低盐指示种，用于指示盐度较低的海洋环境。

我们对海水表层温度、海水表层盐度等环境因素与表层沉积硅藻的确切关系进行了分析。这为后续建立硅藻-环境转换函数，在普里兹湾定量重建这些环境因素的历史变化提供了数据支持。

致谢：国家海洋局极地考察办公室、中国极地研究中心提供的样品以及南极专项(IRASCC2020−2022)对本研究的支持。

参考文献 (References):

陈际雨, 韩正兵, 扈传昱, 等, 2017. 南极普里兹湾营养盐分布特征及季节性消耗[J]. 极地研究, 29(3): 327-337. CHEN J Y, HAN Z B, HU C Y, et al, 2017. Distribution and seasonal depletion of nutrients in Prydz Bay, Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 29(3): 327-337.

程广芬, 曹玉强, 1991. 渤海中、南部表层沉积硅藻的定量分析[J]. 青岛海洋大学学报, 21(4): 56-74. CHENG G F, CAO Y Q, 1991. The quantitative study of the diatoms in surface sediments of central southern part of Bohai Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 21(4): 56-74.

丁蕾, 支崇远, 2006. 环境对硅藻的影响及硅藻对环境的监测[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 24(3): 13-16. DING L, ZHI C Y, 2006. Environmental effects on diatom and its monitor of environment[J]. Journal of Guizhou normal University (Natural Sciences), 24(3): 13-16.

樊鑫, 2018. 长江口及邻近海域沉积硅藻记录及富营养化历史重建[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所). FAN X, 2018. Sediment diatom records and eutrophication reconstruction in the Changjiang River and its adjacent area[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science).

方建勇, 李云海, 尹希杰, 等, 2015. 南极普里兹湾海域夏季表层悬浮颗粒物物质组分研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 35(3): 175-187. FANG J Y, LI Y H, YIN X J, et al, 2015. Composition of summer surficial suspended particles in the Prydz Bay, Antarctica[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 35(3): 175-187.

高郭平, 董兆乾, 侍茂崇, 等, 2013. 南极普里兹湾关键物理海洋学问题研究进展及未来趋势[J]. 上海海洋大学学报, 22(2): 313-320. GAO G P, DONG Z Q, SHI M C, et al, 2013. Advances of physical oceanographic study on Prydz Bay and adjacent region, Antarctica[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 22(2): 313-320.

乐肯堂, 1995. 普里兹湾及邻近海区水团和环流研究述评[J]. 海洋科学, (2): 26-30. LE K T, 1995. Review of the study of water mass and circulation in Prydz Bay and its adjacent sea[J]. Marine Science, (2): 26-30.

李春雷, 李云海, 李国刚, 等, 2021. 南极普里兹湾沉积物重金属分布特征[J]. 海洋环境科学, 40(3): 325-332. LI C L, LI Y H, LI G G, et al, 2021. Distribution of heavy metals in sediments of Prydz Bay, Antarctica[J]. Marine Environmental Science, 40(3): 325-332.

林丽娜, 王颖杰, 张洁, 等, 2017. 中国南极科学考察CTD数据集[J]. 全球变化数据学报(中英文), 1(2): 157-164,176-183. LIN L N, WANG Y J, ZHANG J, et al, 2017. Hydrologic CTD dataset obtained through Chinese Antarctic Expeditions[J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 1(2): 157-164,176-183.

刘俊琢, 2011. 青藏高原湖泊表层沉积物中硅藻分布特征及影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学. LIU J Z, 2011. Characteristics of diatom community and influence factors analysis of lake surface sediment in Qinghai-Tibet Plateau[D].

Lanzhou: Lanzhou University.

刘玥, 庞小平, 赵羲, 等, 2021. 1979—2018年南极海冰边缘区范围时空变化研究[J]. 极地研究, 33(4): 508-517. LIU Y, PANG X P, ZHAO X, et al, 2021. Analysis of temporal and spatial changes in the extent of the Antarctic marginal ice zone from 1979 to 2018[J]. Chinese Journal of Polar Research, 33(4): 508-517.

陆钧, 1997. 南极普里兹湾晚第四纪以来硅藻组合及气候变化的研究[J]. 极地研究, 9(3): 9-15. LU J, 1997. Studies on late Quaternary diatom assemblage and paleoclimate of the Prydz Bay, Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 9(3): 9-15.

马健荣, 刘明, 徐信, 等, 2010. 硅藻研究与应用展望[J]. 山东农业科学, (8): 52-56. MA J R, LIU M, XU X, et al, 2010. Prospect in research and application pf diatoms[J]. Shandong Agricultural Sciences, (8): 52-56.

冉莉华, 2008 . 北大西洋北部全新世气候及海洋环境演变[D]. 上海: 华东师范大学. RAN L H, 2008. The Holocene paleoclimate and paleoceanography in the northern North Atlantic[D]. Shanghai: East China Normal University.

冉莉华, 陈建芳, 金海燕, 等, 2012. 白令海和楚科奇海表层沉积硅藻分布特征[J]. 极地研究, 24(1): 15-23. RAN L H, CHEN J F, JIN H Y, et al, 2012. The distribution of surface sediment diatoms in the Bering Sea and Chukchi Sea[J]. Chinese Journal of Polar Research, 24(1): 15-23.

商志文, 田立柱, 王宏, 等, 2012. 渤海湾中北部表层沉积硅藻分布及环境指示意义[J]. 中国地质, 39(4): 1099-1107. SHANG Z W, TIAN L Z, WANG H, et al, 2012. Diatom assemblages from surficial sediments in north-central Bohai Bay and their implications for environments[J]. Geology in China, 39(4): 1099-1107.

史久新, 乐肯堂, 1999. 东南极冰-海相互作用研究进展[J]. 海洋科学, (1): 22-25. SHI J X, LE K T, 1999. A review on studies of ice-ocean interaction in the East Antarctica[J]. Marine Sciences, (1): 22-25.

史久新, 赵进平, 2002. 中国南大洋水团、环流和海冰研究进展(1995—2002)[J]. 海洋科学进展, 20(4): 116-126. SHI J X, ZHAO J P, 2002. Advances in Chinese studies on water masses, circulation and sea ice in the Southern Ocean (1995-2002)[J]. Advances in Marine Science, 20(4): 116-126.

孙军, 刘东艳, 宁修仁, 等, 2003. 2001/2002年夏季南极普里兹湾及其邻近海域的浮游植物[J]. 海洋与湖沼, 34(5): 519-532. SUN J, LIU D Y, NING X R, et al, 2003. Phytoplankton in the Prydz Bay and the adjacent Indian sector of the Southern Ocean during the austral summer 2001/2002[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 34(5): 519-532.

唐灵刚, 韩喜彬, 黄玥, 等, 2015. 普里兹湾及邻近海区表层沉积硅藻分布与环境分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 35(3): 189-196. TANG L G, HAN X B, HUANG Y, et al, 2015. Distribution of diatoms in surface sediments of Prydz Bay and adjacent waters, Antarctica[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 35(3): 189-196.

王丽艳, 李广雪, 纪凤颖, 等, 2018. 普里兹湾海洋环境季节性变化及其影响因素研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 48(10): 47-59. WANG L Y, LI G X, JI F Y, et al, 2018. The study on seasonal variation characteristics and influencing factors of marine environment in Prydz Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 48(10): 47-59.

王艳娜, 刘东艳, 2013. 海洋沉积硅藻研究方法与应用综述[J]. 地球科学进展, 28(12): 1296-1304. WANG Y N, LIU D Y, 2013. Review of the analysis and application of diatoms in the marine sediments[J]. Advances in Earth Science, 28(12): 1296-1304.

吴聪, 王金莲, 何高文, 等, 2018. 南极乔治王岛与象岛邻近海域表层沉积硅藻组成及分布特征[J]. 地球学报, 39(6): 657-665. WU C, WANG J L, HE G W, et al, 2018. Distribution of diatom assemblages in the surface sediments near the King George Island and Elephant Island, Antarctica[J]. Acta Geoscientia Sinica, 39(6): 657-665.

吴时国, 陆钧, 1998. 南极普里兹湾1.5万年来气候演变的沉积记录[J]. 海洋学报, 20(1): 65-73. WU S G, LU J, 1998. Paleoclimatic evolution recorded in sediments of the Prydz Bay, Antarctica in 15 000 years[J]. Haiyang Xuebao, 20(1): 65-73.

于培松, 张海生, 扈传昱, 等, 2012. 利用沉积生物标志物分析南极普里兹湾浮游植物群落结构变化[J]. 极地研究, 24(2): 143-150. YU P S, ZHANG H S, HU C Y, et al, 2012. Using biomarkers in sediments as indicators to rebuild the phytoplankton community in Prydz Bay, Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 24(2): 143-150.

张凡, 高众勇, 孙恒, 2013. 南极普里兹湾碳循环研究进展[J]. 极地研究, 25(3): 284-293. ZHANG F, GAO Z Y, SUN H, 2013. Advances in carbon-cycle research for Prydz Bay, the Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 25(3):

284-293.

赵军, 于培松, 韩正兵, 等, 2014. 南极普里兹湾表层沉积物有机地球化学特征及其生态环境意义[J]. 极地研究, 26(1): 167-174. ZHAO J, YU P S, HAN Z B, et al, 2014. Organic geochemical characteristics of surface sediments and implications for ecology and environment in Prydz Bay, Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 26(1): 167-174.

郑少军, 史久新, 2011. 南极普里兹湾邻近海域海冰生消发展特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 41(增2): 9-16. ZHENG S J, SHI J X, 2011. The characteristic of sea ice growth and melt in the Prydz Bay region, Antarctica[J]. Periodical of Ocean University of China, 41(Suppl.2): 9-16.

ABRANTES F, GIL I, LOPES C, et al, 2005. Quantitative diatom analyses—a faster cleaning procedure[J]. Deep Sea Research Part I:Oceanographic Research Papers, 52(1): 189-198.

ARMAND L K, CROSTA X, ROMERO O, et al, 2005. The biogeography of major diatom taxa in Southern Ocean sediments: 1. sea ice related species[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 223: 93-126.

BARBARA L, CROSTA X, MASSÉ G, et al, 2010. Deglacial environments in eastern Prydz Bay, East Antarctica[J]. Quaternary Science Reviews, 29(19/20): 2731-2740.

BRIKS H J B, 1995. Quantitative palaeoenvironmental reconstructions[M]. Cambridge: Quaternary Research Association: 161-254.

CAVALIERI D J, PARKINSON C L, GLOERSEN P, et al, 2013. Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1[DS/OL]. Boulder, Colorado, USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. (2013-01-01) [2023-02-18]. https: //nsidc. org/data/nsidc-0051/versions/1 https://doi.org/10.5067/8GQ8LZQVL0VL.

CEFARELLI A O, FERRARIO M E, ALMANDOZ G O, et al, 2010. Diversity of the diatom genus Fragilariopsis in the Argentine Sea and Antarctic waters: morphology, distribution and abundance[J]. Polar Biology, 33(11): 1463-1484.

Environmental Systems Research Institute, Inc., 2014. ArcGIS Help 10.2[Z/OL]. California, USA: Environmental Systems Research Institute, Inc. (2014-04-30) [2023-02-24]. https://resources.arcgis.com/zh-cn/help/main/10.2/.

GEBÜHR C, WILTSHIRE K H, ABERLE N, et al, 2009. Influence of nutrients, temperature, light and salinity on the occurrence of *Paralia sulcata* at Helgoland Roads, North Sea[J]. Aquatic Biology, 7(3): 185-197.

HASLE G R, HEIMDAL B R, 1968. Morphology and distribution of the marine centric diatom *Thalassiosira antarctica* Comber[J]. Journal of Microscopy, 88(3): 357-369.

HASLE G R, SYVERTSEN E E, 1997. Marine diatoms[M]//TOMAS C R, ed. Identifying Marine Phytoplankton. California: Academic Press: 5-385.

HÅKANSSON H, 1984. The recent diatom succession of Lake Havgårdssjön, south Sweden[C]//MANN D G, ed. Proceedings of the seventh international diatom symposium. Philadelphia: Otto Koeltz: 411-429.

JOUSÉ A P, 1968. Species novae Bacillariophytorum in sedimentis fundi Oceani Pacifici et Maris Ochotensis Inventae[J]. Novitates Systematicae Plantarum Non Vascularium: 12-21.

MEDLIN L K, PRIDDLE J, 1990. Polar marine diatoms[M]. Cambridge: British Antarctic Survey.

PIKE J, CROSTA X, MADDISON E J, et al, 2009. Observations on the relationship between the Antarctic coastal diatoms *Thalassiosira antarctica* Comber and *Porosira glacialis* (Grunow) Jørgensen and sea ice concentrations during the late Quaternary[J]. Marine Micropaleontology, 73(1/2): 14-25.

ROMERO O E, ARMAND L K, CROSTA X, PICHON J J, 2005. The biogeography of major diatom taxa in Southern Ocean surface sediments: 3. tropical/subtropical species[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 223(1): 49-65.

SMITH N R, DONG Z Q, KERRY K R, et al, 1984. Water masses and circulation in the region of Prydz Bay, Antarctica [J]. Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers, 31(9): 1121-1147.

TAYLOR F, MCMINN A, FRANKLIN D, 1997. Distribution of diatoms in surface sediments of Prydz Bay, Antarctica[J]. Marine Micropaleontology, 32(3/4): 209-229.

TAYLOR F, MCMINN A, 2002. Late Quaternary diatom assemblages from Prydz Bay, Eastern Antarctica[J]. Quaternary

Research, 57(1): 151-161.

TAYLOR F, A, 2003. Late Quaternary palaeoenvironments in Prydz Bay, East Antarctica: interpretations from marine diatoms[J]. Antarctic Science, 15(4): 512-521.

TER BRAAK C J F, ŠMILAUER P, 2012. CANOCO reference manual and user's guide: software for ordination, version 5.0[M]. Ithaca: Microcomputer Power.

VILLA G, LUPI C, COBIANCHI M, et al, 2008. A Pleistocene warming event at 1 Ma in Prydz Bay, East Antarctica: evidence from ODP site 1165[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 260(1/2): 230-244.

ZHU G H, NING X R, CAI Y M, et al, 2003. Phytoplankton in Prydz Bay and its adjacent sea area of Antarctica during the austral summer (1998/1999)[J]. Acta Botanica Sinica, 45(4): 390-398.

ZONG Y Q, 1997. Mid- and late-Holocene sea-level changes in Roudsea Marsh, northwest England: a diatom biostratigraphical investigation[J]. Holocene, 7(3): 311-323.

Diatoms in Surface Sediments of Prydz Bay, Antarctica and Their Relationship to Environmental Factors

MA Ruiwen, HUANG Yue

（*School of Earth Sciences*, *Yunnan University*, Kunming 650500, China）

Abstract: Based on the data and information of 22 surface sediment samples obtained from Prydz Bay during China's 29th Antarctic Expedition, the diatom assemblages in the study area and the spatial distributions of some principal diatom species were analyzed. A total of 29 diatom species, belonging to 12 genera, were identified from the surface sediments. *Fragilariopsis curta* and *F. kerguelensis* were the dominant species. The relative percentage of 4 sea-ice diatoms, *F. curta*, *F. cylindrus*, *F. ritscheri*, and *F. separanda*, decreased gradually from inside of the bay to the open ocean. Ice-edge diatoms, such as *Thalassiosira antarctica* and *Porosira glacialis*, occupied with high percentage and decreased from the middle region of the Prydz Gyre to the outside. On the contrary, *F. kerguelensis*, *Paralia sulcata* and *Azpeitia tabularis* increased gradually within the bay to the open ocean. A Canonical Correspondence Analysis (CCA) was used to study the relationship between diatoms and environmental factors. The conclusions were drawn: the results of CCA were consistent with the ecology of principal diatom species. *F. curta*, *F. separanda*, *F. cylindrus*, and *F. ritscheri* could be used as low temperature indicator species. Meanwhile, *P. glacialis* and *T. antarctica* might be used as low salinity indicator species. The exact relationship between environmental factors such as sea surface temperature, sea surface salinity et al., and the surface diatom were analyzed which provides the data support for subsequent establishment of diatom-environment transfer function and quantitative reconstruction for the changes of these environmental factors in the past.

Keywords: sediments；environmental factors；Canonical Correspondence Analysis (CCA)；diatoms；Prydz Bay

Received: October 13, 2022