

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2015.03209

晚第四纪普里兹湾北部陆坡岩心 沉积学记录及古海洋学意义

刘合林^{1,2}, 陈志华^{1,2}, 葛淑兰^{1,2}, 肖文申³, 王豪壮^{1,2},
唐正^{1,2}, 黄元辉^{1,2}, 赵仁杰^{1,2}, 武力³

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 青岛 266061;
3. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:通过对普里兹湾北部陆坡 P1-03 岩心沉积物敏感粒级组分的提取和年代学分析, 发现: 大于 $>63 \mu\text{m}$ 的砂砾级组分可作为冰筏碎屑的指示粒级, 过去 52 万年以来该地区共发生了 8 次较大的冰筏碎屑事件, 出现在冰期及间冰期中相对较冷的阶段。分选级粉砂和黏土组分的含量可指示底流强弱, 其旋回变化显示冰期底流较弱, 有利于黏土沉降; 间冰期南极绕极流主轴南移, 陆架-陆坡水体交换加强, 底流增大, 对沉积物的搬运和筛选加强。

关键词: 岩心; 粒级; 冰筏碎屑事件; 底流; 晚第四纪; 普里兹湾陆坡

中图分类号: P736.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0256-1492(2015)03-0209-09

普里兹湾位于南大洋印度洋扇区, 是东南极大陆边缘最大的海湾, 其南端与兰伯特冰川-埃默里冰架体系相连接, 是东南极冰川的主要入海口之一和重要的冰筏碎屑沉积中心^[1-2]。由于其位置特殊, 大洋钻探计划曾在这里实施了两个航次的钻探 (ODP119 和 ODP188 航次), 使我们对东南极冰盖及长周期环境气候演变历史 (构造时间尺度) 有了一定的认识^[2-3], 但是有关该地区晚第四纪以来的古环境、古气候和古海洋学演变历史知之甚少, 末次盛冰期以来的环境气候记录也多局限在普里兹湾陆架^[4-6]。国内学者曾对普里兹湾陆架的 NP93-2 岩心和陆坡的 NP95-1 岩心进行了沉积学、古地磁、元素地球化学和微体古生物等方面的研究^[7-15], 但主要反映了约 15 kaBP 以来的古环境和古气候变化。本文拟通过对普里兹湾北部陆坡区 P1-03 岩心沉积物粒级、磁化率、颜色反射率的综合年代学分析, 揭示该地区晚第四纪 (约 52 万年以来) 多个冰期-间冰期旋回的古海洋学演变特征。

1 区域概况

普里兹湾位于南大洋的印度洋扇区、南极大陆边缘 65°E 与 82°E 之间, 是嵌入南极大陆仅次于威德尔海和罗斯海的第三大海湾。湾东岸为伊丽莎白公主地, 西岸为麦克罗伯逊地海岸和达恩利角, 南面有东南极最大的冰架——埃默里冰架, 向北为南大洋外海 (图 1)。

该地区海底地形复杂 (图 1)。陆架中部为埃默里海盆或洼地, 水深超过 500 m, 最深处超过 700 m; 海盆东侧为四夫人浅滩、西侧为弗拉姆浅滩包围, 北部有普里兹水道从埃默里海盆向北延伸至陆架边缘, 是湾内外水体交换的主要通道^[16]。湾口以北陆架坡折处水深陡增, 自东向西分布着菲利皮、莫里、威尔金斯和怀尔德等海底峡谷, 普里兹水道以北分布有大型的海底扇。再向北, 海底地形渐趋平缓, 水深多在 3 000~4 000 m 之间, 为瓦尔迪维亚深海平原。

普里兹湾及邻近海域分布有绕极深层水、南极底层水、南极表层水和普里兹湾陆架水等水团, 流系较为复杂^[16-18]。南极辐散带以南分布有向西的极地环流和极地沿岸流, 普里兹湾内存在顺时针方向的环流, 弗拉姆浅滩东缘存在上升流; 南极辐散带以北为东向的南极绕极流, 南极辐散带周围有涡旋出现 (图 1)^[19-23]。

基金项目: 南北极环境综合考察与评估专项 (CHINARE2014-01-02, CHINARE2014-04-01, CHINARE2015-01-02, CHINARE2015-04-01); 国家自然科学基金项目 (40176136, 41106166)

作者简介: 刘合林 (1988—), 男, 硕士生, 主要从事南极海洋沉积学研究, Email: liuhelin12138@163.com

通讯作者: 陈志华 (1970—), 男, 研究员, 主要从事极地海洋地质学与沉积物地球化学研究, Email: chenzia@fio.org.cn

收稿日期: 2015-04-15; 改回日期: 2015-05-20. 周立君编辑

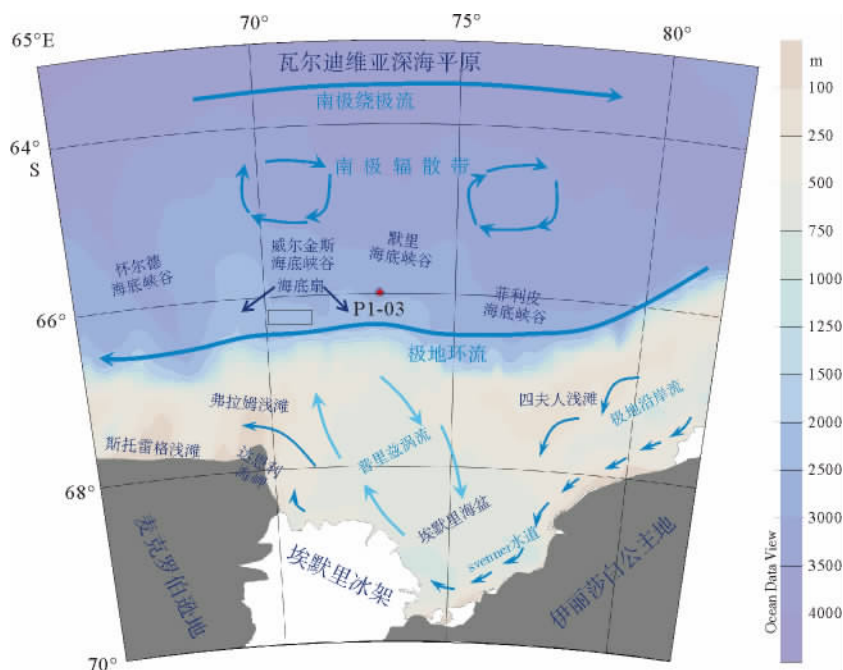


图1 普里兹湾北部陆坡 P1-03 岩心取样位置

Fig. 1 Location of core P1-03

2 样品和方法

本文的研究材料 P1-03 岩心来源于 2013—2014 年的中国第 30 次南极综合考察。岩心取样位置见图 1, 取样点坐标为 $73^{\circ}00'56''E$ 、 $65^{\circ}59'22''S$, 水深为 2 542 m; 取样点大体位于普里兹水道以北的陆坡海底沉积扇前缘(图 1)。

岩心分析包括 AMS¹⁴C 测年、颜色反射率测量、粒度和古地磁等分析。其中, AMS¹⁴C 测年以有机碳中酸不溶组分和有孔虫为材料, 测试分析在美国的 Beta 实验室完成, 分析结果见表 1。沉积物的颜色反射率测量通过 MinoltaCM-2002 手持式光谱光度计获得, 以 $L^*a^*b^*$ 色空间参数表示, 分析间距为 1 cm。粒度分析通过国家海洋局第一海洋研究所粒度实验室的 Mastersizer2000 型激光粒度分析仪获取, 样品上机测试前经过去除有机质、碳酸钙、生物硅、洗盐等步骤, 分析间距为 2 cm。古地磁取样采用边长为 2 cm 的无磁性立方塑料盒, 使用中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代实验室的 KLY4 卡帕桥磁率仪在常温下测量样品的磁化率各向异性(AMS)和体积磁化率(κ), 沉积物的磁化率(χ)由体积磁化率质量归一化获得。

3 结果

3.1 岩心年代地层框架

通过浮游有孔虫和有机质的 AMS¹⁴C 测年以及相对古磁场强度对比法, 综合确定岩心的年代地层框架(图 2)。

岩心上部浮游有孔虫(*N. pachyderma*)和有机质的 AMS¹⁴C 测年结果见表 1。扣除该地区的海洋碳储库年龄(1 300 a), 经 Calib 7.02 软件计算得到 4 个有效的日历年龄。从时间序列来看, 45 cm 处由有机质测年得到的日历年龄为 20.57 kaBP, 较下部 79 cm 处由有孔虫测年得到的日历年龄(19.40 kaBP)老, 该处有机质年龄可能受老碳污染等影响较大, 所以不作为地层年代控制点。

岩心 79 cm 以下段的年龄依据古地磁结果(相对地磁场强度及方向, 葛淑兰等将另文发表)确定。通过岩心沉积物相对地磁场强度与全球海洋沉积记录的相对地磁场强度叠加曲线 PISO1500^[24] 的对比, 得到 15 个年龄控制点和岩心各层段的沉积速率(表 2, 图 2)。然后, 通过内插法得到岩心不同深度的年龄; 通过底部控制点外推得到岩心的底部年龄约为 525 kaBP, 属 MIS13 期。岩心沉积速率的变化范围为 0.60~9.06 cm/ka, 平均值为 1.08 cm/ka, 岩心取样的时间分辨率平均约为 2.16 ka。

表 1 P1-03 岩心 AMS¹⁴C 测年结果及校正后的日历年龄
Table 1 AMS¹⁴C and calendar age of Core P1-03 after correction

深度/cm	测年材料	AMS ¹⁴ C 年龄/aBP	碳储库年龄/a	日历年龄/cal. aBP±2σ
1	有机碳	5 560±30	1 300	4 870±15
17	有机碳	11 890±40	1 300	12 560±49
45	有机碳	18 360±60	1 300	20 570±75
79	浮游有孔虫(<i>N. pachyderma</i>)	17 380±50	1 300	19 400±91
99	浮游有孔虫(<i>N. pachyderma</i>)	>43 500	1 300	

表 2 P1-03 岩心相对古磁场强度推导年龄
Table 2 Core P1-03 ages inferred by relative paleointensity correlation

深度/cm	古地磁对比得到的年龄/kaBP
93	41.0
153	99.0
179	120.0
243	194.0
271	220.0
321	278.0
383	338.0
457	409.0
499	430.0
539	497.0
557	519.0

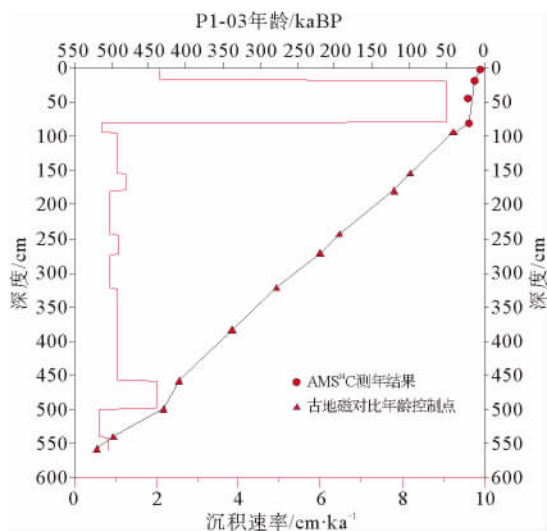
3.2 岩心沉积地层特征

岩心岩性地层、磁化率(χ)、颜色反射率(亮度 L*、红度 a*、黄度 b*)、粒度组成(砂、粉砂和黏土含量)及粒度参数(平均粒径 Mz 和分选系数 δ)的垂向分布见图 3,基本特征简述如下:

岩心岩性主要为黏土质粉砂,沉积物组分在 101~130 和 399~423 kaBP 主要为粉砂颗粒。302~312 和 353~372 kaBP 分别为灰黑色和灰色砂砾层,砾石主要呈黑色。砂和黏土含量在冰期高,间冰期低。分选系数在冰期大,沉积物分选差;分选系数在间冰期较小,沉积物分选性相对较好。岩心沉积物平均粒径(Mz)为 2.7~166.6 μm,平均值为 9.5 μm;平均粒径在冰期较大,在间冰期较小。磁化率 χ 变化显著,在 524~410、337~210 和 210~27 kaBP 三个阶段有升高趋势,在 410~337、27~0 以及 210 kaBP 处,磁化率 χ 降低。亮度 L* 和黄度 b* 值波动不明显,整体变化幅度较小,在间冰期略有升高,在 302~312 kaBP 段黑色砂砾层出现最小值。红度 a* 值波动幅度相对较大,但其高值在冰期和间冰期均有出现。

3.3 环境敏感粒级的提取

沉积物粒度是沉积环境包括沉积物来源和沉积动力的综合反映,利用激光粒度分析方法可获得粒度间隔为 0.25 φ、粒径小于 2 mm 的沉积物的粒度组成。以不同粒度组分的百分含量为变量,通过 SPSS 19 软件对 P1-03 岩心共 281 个样品的粒度分析数据进行主成分分析,得到累积方差达 83.67% 的两个主成分因子的载荷见表 3。从该表来看,两个主因子中均有一些载荷较高的粒级出现,且粒级单元较为集中,说明各主因子与沉积物粒级之间的专属性明显,不同粒级受不同的环境要素所制约。因子 1 在初始因子中所占的方差贡献为 51.36%,旋转后所占的方差贡献为 49.16%,其正高载荷集中在 <3.90 μm 的细粒级,负高载荷集中在 9.29~



红色三角:相对地磁场强度对比年龄控制点;
红色圆点,AMS¹⁴C 校正后的日历年龄
Red triangle, reference points for relative intensity of paleomagnetism; red circle: corrected AMS¹⁴C calendar age

图 2 P1-03 岩心深度-年龄模式

Fig. 2 The depth-age model of core P1-03

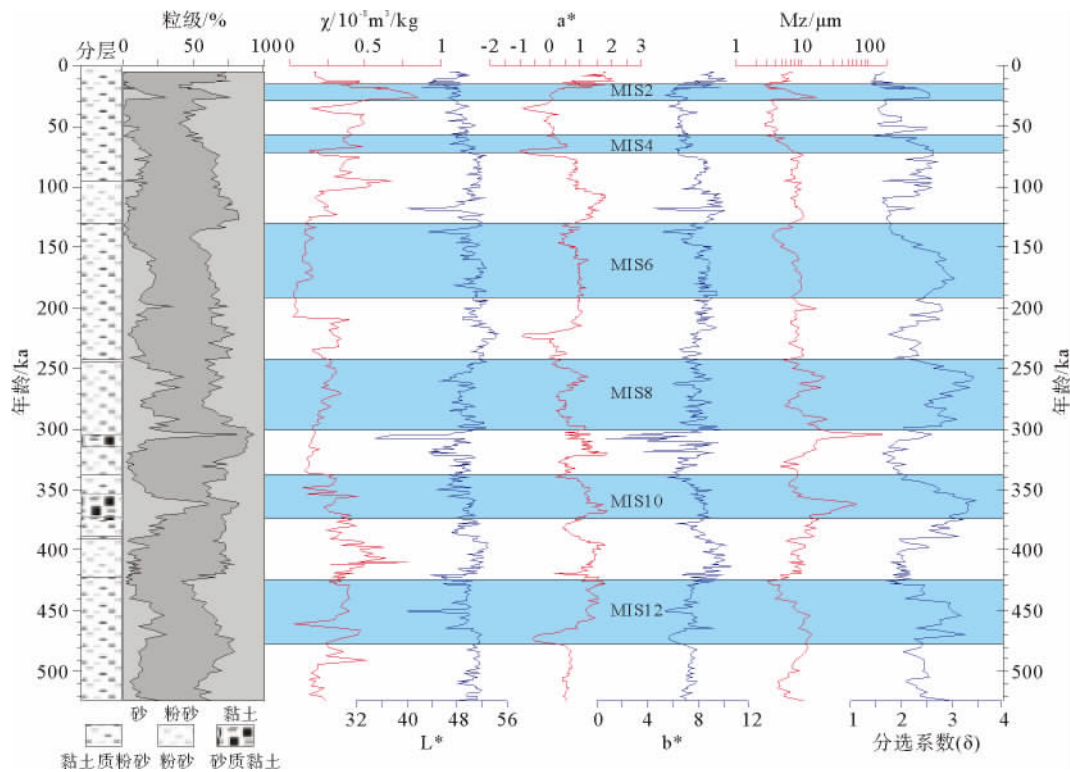


图3 P1-03 岩心岩性地层与主要沉积学指标的变化

(氧同位素分期据 Lisiecki and Raymo^[25])

Fig. 3 Lithostratigraphy and temporal variations in major sedimentary indexes of core P1-03

(Marine isotope stages (MIS) from Lisiecki and Raymo^[25])

63.00 μm 粒级; 因子 2 在初始因子中所占的方差贡献为 32.31%, 旋转后所占的方差贡献为 34.51%,

其正高载荷集中在 >63 μm 的粗粒级, 负高载荷集中在 4.65~9.29 μm 粒级。

表3 P1-03 岩心沉积物粒度主成分因子载荷分析

Table 3 The rotated component score matrix of grain sizes of core P1-03

粒级/μm	因子 1	因子 2	粒级/μm	因子 1	因子 2
2000.00~500.00	-0.016	0.698	11.05~13.14	-0.753	-0.608
420.40~500.00	0.013	0.815	9.29~11.05	-0.615	-0.730
353.60~420.40	0.023	0.834	7.81~9.29	-0.402	-0.845
297.30~353.60	0.052	0.856	6.57~7.81	-0.111	-0.916
250.00~297.30	0.065	0.879	5.52~6.57	0.201	-0.900
210.20~250.00	0.050	0.907	4.65~5.52	0.449	-0.817
176.80~210.20	-0.003	0.939	3.90~4.65	0.620	-0.713
148.70~176.80	-0.085	0.939	3.28~3.90	0.737	-0.612
125.00~148.70	-0.173	0.896	2.76~3.28	0.821	-0.517
105.10~125.00	-0.253	0.832	2.32~2.76	0.883	-0.423
88.40~105.10	-0.332	0.763	1.95~2.32	0.925	-0.331
74.30~88.40	-0.428	0.684	1.64~1.95	0.945	-0.247
63.00~74.30	-0.547	0.583	1.38~1.64	0.951	-0.180
52.60~63.00	-0.679	0.441	1.16~1.38	0.949	-0.140
44.20~52.60	-0.788	0.272	0.98~1.16	0.948	-0.123
37.20~44.20	-0.854	0.117	0.82~0.98	0.948	-0.120
31.25~37.20	-0.890	-0.008	0.69~0.82	0.949	-0.118
26.28~31.25	-0.909	-0.108	0.58~0.69	0.950	-0.107
22.10~26.28	-0.918	-0.198	0.49~0.58	0.948	-0.083
18.58~22.10	-0.913	-0.289	0.41~0.49	0.943	-0.042
15.63~18.58	-0.890	-0.387	0.35~0.41	0.930	0.023
13.14~15.63	-0.840	-0.493	<0.35	0.880	0.057

4 讨论

4.1 沉积物敏感粒级组分的环境制约

在极地海洋沉积物中,粗颗粒的冰筏碎屑普遍存在,大于 $>63\ \mu\text{m}$ 的砂砾级组分通常用来作为冰筏碎屑的指示粒级^[26-30];与此同时,4~63 μm 的粉砂和 $<4\ \mu\text{m}$ 的黏土是构成正常深海-半深海沉积物的主要物质基础。从前面的因子分析来看,P1-03岩心沉积物粒度组成的变化总体上反映了正常半深海沉积($<63\ \mu\text{m}$ 粒级)与极地冰筏碎屑沉积($>63\ \mu\text{m}$ 粒级)的消长变化。如图4a所示,因子1的正高载荷粒级($<3.90\ \mu\text{m}$)和负高载荷粒级(9.29~63.00 μm)呈负相关,相关系数 R^2 为0.61;前者在冰期高,后者在间冰期高(图5),说明在正常半深海沉积物中黏土和粗粉砂的搬运和沉积作用机制不同。就沉积物的来源来看,深海-半深海黏土通常与河流或风尘物质的输入关系较为密切。环南极大陆基本上无河流,河流的贡献可忽略。对南大洋和南极大陆矿物粉尘的研究表明,尽管南美洲、澳大利亚和非洲南部的粉尘对研究区均有一定影响,但其沉积速率在 $10^{-12}\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下^[31],与Duce等对南大洋现代风成通量的估计大体相当(0.001~

0.01 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{ka}^{-1}$ ^[32]),其对研究区现代或晚第四纪间冰期沉积物的贡献很小。Bareille等依据东南印度洋系列岩心的矿物、地球化学和Sr同位素的研究认为,该海区冰期碎屑主要来源于Kerguelen-Crozet海台/群岛的幔源(火山源)物质以及南极大陆的壳源物质,碎屑通量的增加可能主要受水流而不是风成搬运的影响;同时,假设末次盛冰期南大洋风成通量和Votsok粉尘通量一样同比增大15倍,其值为0.015~0.15 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{ka}^{-1}$,尚不足该时期东南印度洋扇区陆源碎屑总通量的5%^[33];因此,不论是冰期还是间冰期,东南极大陆边缘区风成物质的贡献不大。在南极大陆边缘,黏土矿物也可通过冰海沉积作用过程来提供,如它可沿不同的海流或水团搬运很远的距离,可通过絮凝和聚合作用等快速沉淀,也可通过重力流(浊流和碎屑流)和雾状层等发生再悬浮、再搬动和再沉积,但总体反映了水动力相对较弱的海底沉积环境^[34-36]。10~63 μm 的粗粉砂粒级通常被称之为可分选粉砂(SS),因为它在水中既不发生粘连,又能被海流搬运和筛选,所以其含量的高低变化可用来表征海底流速的变化;底流越大,深海沉积物的筛选就越明显,黏土组分越不易沉淀,粗粉砂含量随之增加^[37-39]。如图4b所示,因子2的正高载荷粒级($>63\ \mu\text{m}$)和负高载荷粒级(4.65~9.29 μm)呈明显负相关,相关系数 R^2

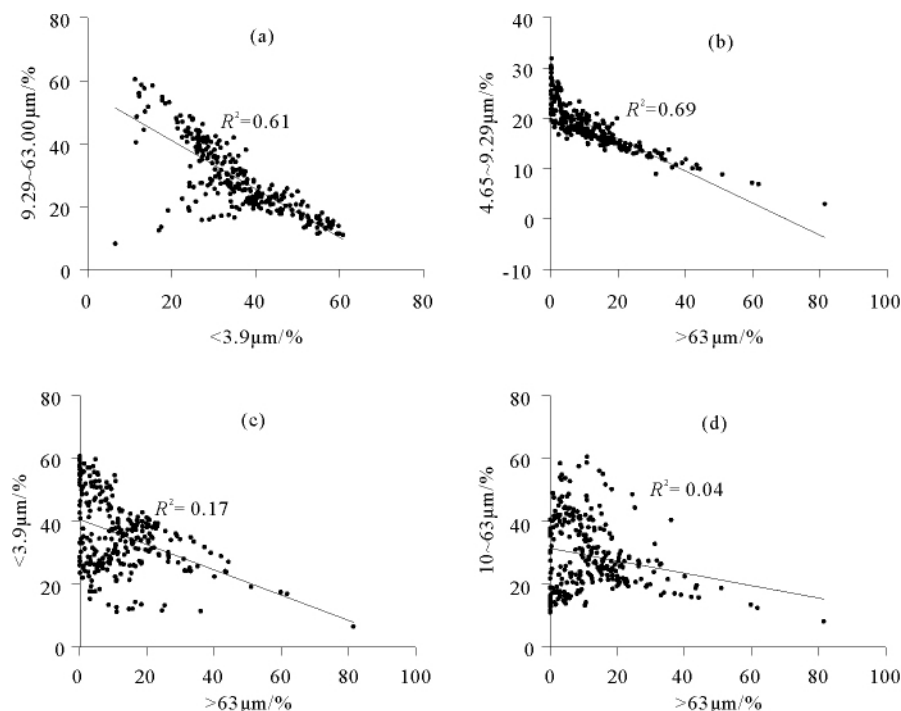


图 4 P1-03 岩心沉积物敏感粒级之间的相关性分析

Fig. 4 The correlations between sensitive grain size components

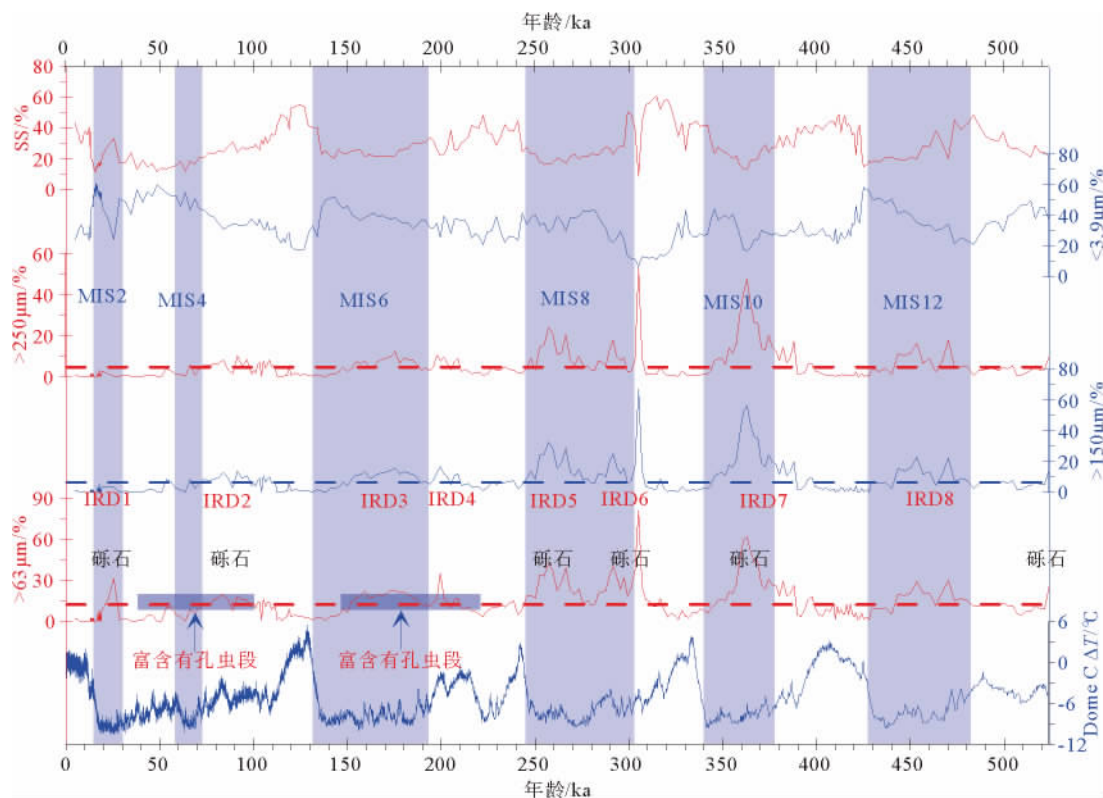


图5 普里兹湾北部陆坡 P1-03 岩心冰筏碎屑与可分选粉砂和黏土的年代变化及其与 Dome C 冰心氢同位素温差记录^[40]的对比

Fig. 5 Temporal distribution of ice-rafted debris, sorted silt, and clay contents in core P1-03, with comparison to air temperature difference recorded by Dome C ice hydrogen isotope

为 0.69, 而它与黏土和水流可搬运的粗粉砂组分之间的负相关性较弱(图 4c 和 4d), 说明冰筏碎屑对正常半深海沉积物粒度的影响不一; 从粒级平均的角度来看, 细粉砂粒级更能代表正常半深海沉积, 可见沉积物源的变化不是粒度分异的主要原因, 水动力的变化可造成黏土和粗粉砂的分异。

4.2 冰筏碎屑事件与冰川消长

冰筏碎屑(IRD)是一种无分选的混杂堆积, 其粒径变化范围很大, 包括砾石、砂、粉砂和黏土, 因其与正常海洋沉积物相比富含粗碎屑组分, 所以人们常用 $>63\mu\text{m}$ 、 $>150\mu\text{m}$ 、 $>250\mu\text{m}$ 和 $>2\text{mm}$ (砾石) 等粒级含量来表征冰筏碎屑的含量变化^[26-30]。如图 5 所示, P1-03 岩心沉积物中 $>63\mu\text{m}$ 、 $>150\mu\text{m}$ 和 $>250\mu\text{m}$ 粒级含量的变化趋势大体相同, 且多个深度发现有砾石, 大小为 2~6 cm 不等。从当前东南极大陆边缘特别是普里兹湾地区冰架、入海冰川和冰山分布的普遍性来看^[41], 用 $>63\mu\text{m}$ 粒级既能反映明显的冰筏碎屑事件(或阶段性事件), 又能反映冰筏搬运的连续性。根据 $>63\mu\text{m}$ 、 $>150\mu\text{m}$ 和 $>250\mu\text{m}$ 组分的峰值变化, 大体可确认过去 52 万年以来普里兹湾陆坡地区共发生了 8 次较大

的冰筏碎屑事件(图 5)。冰筏碎屑事件主要出现在冰期以及间冰期中相对较冷的阶段, 反映出冷期气候有利于冰盖/冰川的积累和扩张, 在扩张过程中冰架的解体使得大量冰山入海, 冰筏碎屑的沉积通量增大。从冰筏碎屑含量的高低来看, MIS8 期和 MIS10 期冰筏碎屑含量最高, 可能反映该时期东南极冰盖-冰架的稳定性较差, 类似的报道见于 Adélie 地附近海域^[36]。

4.3 晚第四纪冰期-间冰期普里兹湾北部陆坡底流演变

P1-03 岩心采集于普里兹湾北部陆坡、普里兹水道以北的海底沉积扇前缘, 该地区现代陆坡锋面过程显著, 水团和流系复杂(图 1), 是南极底层水(AABW)的重要生成区之一^[19-23]。由于目前物理海洋学上对该地区南极底层水的认识并不统一, 有关该地区晚第四纪底流沉积记录的研究尤为重要。从图 5 来看, 可分选粉砂粒级(SS)含量在 MIS12、MIS10、MIS8、MIS6、MIS4-MIS2 等冰期低, 在 MIS13、MIS11、MIS9、MIS7、MIS5、MIS1 等间冰期高, 而黏土含量的变化正好相反, 说明冰期随着普里兹湾大部分地区着底冰川向北扩展到达陆架边缘的

同时,冰架和海冰覆盖区以及各海洋锋面同步向北迁移,普里兹湾陆坡区底流减弱,以冰筏和静水沉积(黏土)为主。对 Adélie 海岸陆坡岩心沉积物过剩²³⁰Th 的研究表明,该海区冰期沉积物的聚合系数大,反映底流较弱,悬浮体浓度较高;沉积物的供应因底层水密度的不同,可通过浊流、顺坡的海底雾状层和脱离陆坡的悬浮雾状层等方式搬运,然后沉降下来^[36]。间冰期随着海平面上升和着底冰川的消失,冰架和季节性海冰覆盖区向南退缩,与此同时南极绕极流主轴南移,绕极深层水的上涌加强,普里兹湾陆架与深海-半深海区之间的水团交换加强;自普里兹水道向北输送的陆架水增多,它与南极表层水、绕极深层水和变性绕极深层水发生混合,形成南极底层水,并逐渐向北扩散。该过程可能导致普里兹湾陆坡,特别是普里兹水道口附近海域底流速度增大,对海底沉积物的搬运和筛选增强,沉积物中可分选粗粉砂粒级含量增大。伴随着间冰期-冰期南极绕极流主轴的南北向迁移,类似的海底沉积物粒度变化趋势在南大洋斯科舍海等地亦有记录^[42]。来自东南极 Adélie 海岸陆坡岩心的记录也表明,MIS9 期沉积物的聚合系数小于 1,沉积物的筛选明显^[36]。从 Dome C 冰心氢同位素温差记录^[40]与 P1-03 岩心冰筏碎屑、可分选粗粉砂和细粒黏土的协同变化来看(图 5),晚第四纪东南极大陆边缘冰-海-汽相互作用明显,但要深入解析冰期-间冰期该地区冰川、水团和流系的变化及其对全球变化的响应和反馈,还有待通过大量岩心的古海洋综合研究。

5 结论

(1) 大于 63 μm 的砂砾级组分可作为冰筏碎屑的指示粒级;大体可确认过去 52 万年以来普里兹湾陆坡地区共发生了 8 次较大的冰筏碎屑事件。冰筏碎屑事件主要出现在冰期及间冰期中相对较冷的阶段,反映出冷期气候有利于冰盖/冰川的积累和扩张,在扩张过程中冰架的解体使得大量冰山入海,冰筏碎屑的沉积通量增大。

(2) 分选级粉砂含量在冰期低,在间冰期高,而黏土含量的变化正好相反,说明冰期研究区底流较弱,以冰筏和静水沉积(黏土)为主,并可能发育浊流和雾状层。间冰期随着海平面上升和着底冰川的消失,冰架和季节性海冰覆盖区向南退缩,南极绕极流主轴南移,普里兹湾陆架与陆坡水体交换加强,陆坡锋面过程显著,该过程可能导致普里兹湾陆坡特别是普里兹水道口附近海域底流速度增大,对海底沉

积物的搬运和筛选增强。

致谢:感谢中国第 30 次南极科学考察队特别是后甲板工作组为样品的取得付出了艰辛的劳动,感谢极地沉积物样品库和国家海洋局极地考察办公室给予的一贯支持。感谢同济大学王汝建老师提出宝贵的修改意见,感谢中国科学院地质与地球物理研究所刘建兴博士给予的帮助。

参考文献(References)

- [1] Passchier S, O'Brien P, Damuth J, et al. Pliocene-Pleistocene glaciomarine sedimentation in eastern Prydz Bay and development of the Prydz trough-mouth fan, ODP Sites 1166 and 1167, East Antarctica[J]. *Marine Geology*, 2003, 199(3): 279-305.
- [2] Passchier S. Linkages between East Antarctic Ice Sheet extent and Southern Ocean temperatures based on a Pliocene high-resolution record of ice-rafted debris off Prydz Bay, East Antarctica[J]. *Paleoceanography*, 2011, 26(4): 1-13.
- [3] Barron J, Baldauf J, Barrera E, et al. Biochronologic and magnetostratigraphic synthesis of Leg 119 sediments from the Kerguelen Plateau and Prydz Bay, Antarctica[C]//Barron J, Larsen B, et al, Proc ODP, Sci Results. 1991, 119: 813-847.
- [4] Mackintosh A, Golledge N, Domack E, et al. Retreat of the East Antarctic ice sheet during the last glacial termination[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(3): 195-202.
- [5] Barbara L, Crosta X, Massé G, et al. Deglacial environments in eastern Prydz Bay, East Antarctica[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(19): 2731-2740.
- [6] Mackintosh A N, Verleyen E, O'Brien P E, et al. Retreat history of the East Antarctic Ice Sheet since the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014: 10-30.
- [7] 侯红明, 王保贵. 南极普里兹湾 NP93-2 柱样磁组构特征及其古气候意义[J]. *地球物理学报*, 1996, 39(6): 747-752. [HOU Hongming, WANG Baogui, TANG Xianzan. Magnetic fabric characteristic of core NP93-2 from Prydz Bay, Antarctic and its paleoclimatic significance[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1996, 39(6): 747-752.]
- [8] 王保贵, 侯红明, 汤贤赞, 等. 东南极普里兹湾 NP93-2 柱样古地磁结果[J]. *南极研究*, 1996, 8(1): 47-52. [WANG Baogui, HOU Hongming, TANG Xianzan, et al. Paleomagnetic results of core NP93-2 from the Prydz Bay, East Antarctic [J]. *Antarctic Research*, 1996, 8(1): 47-52.]
- [9] 吴时国, 陆钧. 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*, 1996, 8(1): 65-74. [WU Shiguo, LU Jun. Paleomagnetic results of core NP93-2 from the Prydz Bay, East Antarctic [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1996, 8(1): 65-74.]
- [10] 吴时国, 罗又郎, 王有强, 等. 南极普里兹湾全新世的冰海沉积[J]. *极地研究*, 1998, 10(1): 47-54. [WU Shiguo, LUO Youlang, WANG Youqiang. Holocene glacial marine sedi-

- mentation in Prydz Bay, Antarctic [J]. Chinese Journal of Polar Research, 1998, 10(1): 47-54.]
- [11] 侯红明, 王保贵, 汤贤赞. 南极 15 ka 以来海洋沉积物的环境磁学研究[J]. 极地研究, 1997, 9(1): 35-43. [HOU Hongming, WANG Baogui, TANG Xianzan. Environmental magnetism of marine sediments from Antarctic since 15 kaBP[J]. Chinese Journal of Polar Research, 1997, 9(1): 35-43.]
- [12] Baogui W, Hongming H, Xianzan T, et al. Paleomagnetic results of Core NP93-2 from the Prydz Bay, Eastern Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 1996, 7(1): 34-40.
- [13] 侯红明, 罗又郎. 南极海洋沉积物中 Heinrich 层的发现及其全球变化意义[J]. 科学通报, 1998, 43(11): 1206-1210. [HOU Hongming, LUO Youlang. The discovery of Heinrich Layers in Antarctic marine sediments and its significance of global change[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(11): 1206-1210.]
- [14] 涂霞, 郑范. 南极普里兹湾柱样有孔虫研究[J]. 南极研究, 1996, 8(4): 47-58. [TU Xia, ZHEN Fan. Foraminifera of downcore from the Prydz Bay, Antarctic [J]. Antarctic Research, 1996, 8(4): 47-58.]
- [15] Xia T, Fan Z. A study of foraminifera in the core NP93-2 from the Prydz Bay, Antarctica [J]. Antarctic Research, 1996, 7(2): 126-140.
- [16] 陈红霞, 林丽娜, 史久新. 南极普里兹湾及其邻近海域水团研究[J]. 海洋学报, 2014, 36(7): 1-8. [CHEN Hongxia, LIN Lina, SHI Jiuxin. Study on water masses in Prydz Bay and its adjacent sea area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014; 36(7): 1-8.]
- [17] 侍茂崇, 宁修仁. 普里兹湾西部海域的水文特征[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 1995, 25: 277-292. [SHI Mao-chong, NING Xiuren. The hydrological characteristics of the western Prydz Bay. [J]. Journal of Qingdao Ocean University, 1995, 25: 277-292.]
- [18] 高郭平, 董兆乾, 侍茂崇. 南极普里兹湾附近 73°E 断面水文结构及多年变化[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(4): 493-502. [GAO Guoping, DONG Zhaoqian, SHI Maochong, et al. Variation of hydrographic features along 73°E section near Prydz Bay [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(4): 493-502.]
- [19] Yabuki T, Suga T, Hanawa K, et al. Possible source of the Antarctic bottom water in the Prydz Bay region[J]. Journal of Oceanography, 2006, 62(5): 649-655.
- [20] 高郭平, 董兆乾, 侍茂崇, 等. 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, 2013, 22(2): 313-20. [GAO Guoping, DONG Zhaoqian, SHI Mao-chong, et al. Advances of physical oceanographic study on Prydz Bay and its adjacent region, Antarctica[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(2): 313-320.]
- [21] 蒲书箴, 董兆乾. 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, DONG Zhaoqian. Features of circumpolar deep water, Antarctic bottom water and their movement near the Prydz Bay [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(3): 1-8.]
- [22] 蒲书箴, 董兆乾, 胡筱敏, 等. 普里兹湾海域的夏季上层水及其北向运动[J]. 极地研究, 2000, 12(3): 157-168. [PU Shuzhen, DONG Zhaoqian, HU Xiaomin, et al. Water masses and their northward extension in the upper ocean of Prydz Bay, Antarctica [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2000, 12(3): 157-168.]
- [23] 蒲书箴, 董兆朝. 普里兹湾陆缘水边界的变化[J]. 海洋通报, 2000, 19(6): 1-9. [PU Shuzhen, DONG Zhaoqian, HU Xiaomin, et al. Variability of the continental water boundary near the Pryda Bay [J]. Marine Science Bulletin, 2000, 19(6): 1-9.]
- [24] Channell J, Xuan C, Hodell D. Stacking paleointensity and oxygen isotope data for the last 1.5 Myr (PISO-1500) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 283(1): 14-23.
- [25] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. Paleceanography, 2005, 20: PA1003. doi:10.1029/2004PA001071.
- [26] Clark D L, Hanson A. Central Arctic Ocean sediment texture: a key to ice transport mechanisms [C]// Glacial-marine sedimentation. Springer, 1983: 301-330.
- [27] Reimnitz E, McCormick M, Bischof J, et al. Comparing sea-ice sediment load with Beaufort Sea shelf deposits: Is entrainment selective? [J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68(5).
- [28] Bischof J, Clark D L, Vincent J S. Origin of ice-rafted debris: Pleistocene paleoceanography in the western Arctic Ocean [J]. Paleceanography, 1996, 11(6): 743-56.
- [29] 王汝建, 肖文申, 李文宝, 等. 北冰洋西部楚科奇海盆晚第四纪的冰筏碎屑事件[J]. 科学通报, 2009, 54(23): 3761-3770. [WANG Rujian, XIAO Wenshen, LI Wenbao, et al. The late Quaternary ice rafted debris events in Chukchi basin, Western Arctic Ocean [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(23): 3761-3770.]
- [30] 陈志华, 陈毅, 王汝建, 等. 末次冰消期以来白令海盆的冰筏碎屑事件与古海洋学演变记录[J]. 极地研究, 2014, 26(1): 17-28. [CHEN Zhihua, CHEN Yi, WANG Rujian, et al. Ice-rafted detritus events and paleoceanographic records in the Bering Basin since the Last Deglaciation [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2014, 26(1): 17-28.]
- [31] Li F, Ginoux P, Ramaswamy V. Distribution, transport, and deposition of mineral dust in the Southern Ocean and Antarctica: contribution of major sources [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113 (D10207). doi: 10.1029/2007JD009190.
- [32] Duce R A, Liss P S, Merrill J T, et al. The atmospheric input of trace species to the world ocean [J]. Global Biogeochem. Cycles, 1991, 5(3): 193-260.
- [33] Bareille G, Grousset F E and Labracheri M. Origin of detrital fluxes in during the last climatic cycles the southeast Indian Ocean [J]. Paleceanography, 1994, 9(6): 799-819.
- [34] Anderson J B, Kurtz D D, Domack E W, et al. Glacial and glacial marine sediments of the Antarctic continental shelf

- [J]. *Journal of Geology*, 1980, 88: 399-414.
- [35] Ehrmann W U, Melles M, Kuhn G, et al. Significance of clay mineral assemblages in the Antarctic Ocean[J]. *Marine Geology*, 1992, 107: 249-273.
- [36] Prestia M, Barbara L, Denis D, et al. Sediment delivery and depositional patterns off Adélie Land (East Antarctica) in relation to late Quaternary climatic cycles[J]. *Marine Geology*, 2011, 284: 96-113.
- [37] McCave I, Hall I. Size sorting in marine muds: Processes, pitfalls, and prospects for paleoflow-speed proxies[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(10):1-37.
- [38] McCave I, Manighetti B, Robinson S. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: parameters for palaeocurrent speed and palaeoceanography[J]. *Oceanographic Literature Review*, 1996, 10(43):593-610.
- [39] Denis D, Crosta X, Schmidt S, et al. Holocene glacier and deep water dynamics, Adélie Land region, East Antarctica [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(13):1291-1303.
- [40] Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, et al. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years[J]. *Science*, 2007, 317(5839):793-796.
- [41] Tournadre J, Girard-Ardhuin F, Legrésy B. Antarctic icebergs distributions, 2002-2010[J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, 117: C05004, 1-15, doi:10.1029/2011JC007441.
- [42] Pudsey C J, Howe J A. Quaternary history of the Antarctic Circumpolar Current: evidence from the Scotia Sea[J]. *Marine Geology*, 1998, 148: 83-112.

LATE QUATERNARY SEDIMENTARY RECORDS AND PALEOCEANOGRAPHIC IMPLICATIONS FROM THE CORE ON CONTINENTAL SLOPE OFF THE PRYDZ BAY, EAST ANTARCTIC

LIU Helin^{1,2}, CHEN Zhihua^{1,2}, GE Shulan^{1,2}, XIAO Wenshen³, WANG Haozhuang^{1,2},
TANG Zheng^{1,2}, HUANG Yuanhui^{1,2}, ZHAO Renjie^{1,2}, WU Li³

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;

2. Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;

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

Abstract: Environment sensitive grain size components of the sediments of the core P1-03, recovered from the continental slope off the Prydz Bay, were analyzed. Eight events of ice-rafted debris were identified for the past 520 ka, which mostly occurred in the glacials and the relatively cold periods in interglacials. The amount of sorted silt and clay fractions reflect the strength of bottom currents. Their cyclic variations suggest that the bottom currents were relatively weak during ice ages, which is favorable for clay deposition, while intensive during interglacial stages, together with the southward shift of the main axis of the Antarctic Circumpolar Current, and the increase in water exchange between shelf and slope.

Key words: sediment core; grain size; ice-rafted detritus events; bottom current; Late Quaternary; continental slope off Prydz Bay