

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2015.03157

南极半岛 Bransfield 海峡 6 kaBP 以来的古气候 变化及其对 ENSO 的响应

聂森艳, 肖文申, 王汝建

(同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 南极半岛是对全球变暖最敏感的区域之一, 研究其全新世以来的气候变化有助于我们理解南大洋高纬地区的气候变化规律。通过中国第 28 次南极科学考察在南极半岛 Bransfield 海峡采集的 D1-7 岩心样品火山灰丰度统计、粗颗粒组分、粒度组分、硅藻海冰种等研究, 重建了该岩心 5.83 ka 以来的古海洋与古气候变化。该岩心可识别出 13 个火山灰层, 其主要来源于 Deception 岛, 并与附近的火山灰记录有很好的对应关系。该区域粗颗粒组分和粒度组分指示了 9 次 IRD 事件 (IRD 1—9, 年龄分别为 0.84、0.97、1.18、1.89、2.05、2.25、2.45、4.46 和 5.09 ka), 在晚全新世, 尤其是 2.5 ka 以来, 频繁出现的 IRD 事件响应于 ENSO 活动的强弱, ENSO 活动显著增强时, 向南极半岛输送的水汽增多, 进而使得南极半岛冰川不稳定性增加, 融化速度加快, 冰川的排泄增加。晚全新世 3.5 ka 以来, 硅藻海冰种含量显著增多, 指示海冰扩张; 同时, 分选级粉砂平均粒径的减小指示底流的减弱, 反映了晚全新世以来南极半岛区域气候变冷, 西风带北移。

关键词: 冰川排泄; 海冰; 底流; ENSO; 南极半岛

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2015)03-0157-10

全新世被认为是一气候稳定适宜期, 但是在千年尺度上, 气候存在快速变化, 且在不同区域间亦存在气候差异, 这在环南极地区也不例外^[1]。南极半岛及周边海域的气候变化近年成为重点关注的课题。历史观测数据显示, 近数十年该区域成为全球气候增温幅度最大, 变化速率最快的区域之一^[2-5]。这种异常快速升温引发了南极地区环境的快速改变, 如南极半岛 Larsen B 冰架近年来的变薄崩塌程度是全新世以来前所未有的^[6]。与此相对, 东南极地区气温在近数十年并没有显著的变化^[2,5], 这表明南极现代气候变化存在差异。深入调查南极半岛区域全新世古气候与古环境的研究有助于我们理解该区域在全球气候变暖背景下的气候响应。

南极高分辨率古气候变化的重建主要依赖于冰心研究^[7], 借助冰心研究可以提供诸如过去全球大气成分^[8-9]、南大洋生产力和铁通量的冰期-间冰期循环^[10]以及南北极气候变化的跷跷板效应^[11-12]

等。但是, 冰心载体在全新世南极气候变化研究中存在一些不足, 如不能准确地记录南极沿岸地区的气候与环境变化, 这主要是由于受水汽来源的影响, 内陆冰心同位素组成变化小, 而近岸的冰心由于冰架处于不断变化中也很难准确记录到高分辨率的气候变化^[7], 因此, 开展高分辨率的海洋沉积记录研究就显得尤为重要。

南极半岛已有的全新世海洋沉积记录集中在 Palmer Deep 海盆, 如 ODP 1098 站位沉积物中的硅藻稳定氧同位素记录^[13]显示了该区域存在两个较暖期, 分别为 13.0~12.1 ka 的冰消期和 11.5~9.0 ka 的早全新世大暖期; 而中全新世的气候稳定期并不显著; 晚全新世以来氧同位素明显变轻, 表明冰川排泄增加, 这与该站位的磁化率增高记录相一致^[14], 指示陆源输入的增加, 同时与 James Ross 岛的冰心记录一致, 指示气候变冷的过程^[1]; 该海盆另一海洋沉积岩心 JPC-10 的综合指标记录显示 7~3.8 ka 期间该海域有微弱的降温趋势, 季节性海冰增加, 晚全新世以来海冰扩张^[15]。目前, 南极半岛 Bransfield 海峡的古气候与古海洋学研究相对较少, 且缺乏不同指标间的综合对比。

在极区海洋, 被冰筏携带卸载到海底的粗颗粒组分是沉积物中陆源的重要组分, 其含量常常被用来指示海冰和周围陆地冰川垮塌后的搬运^[16], 被称

基金项目: 南北极环境综合考察与评估专项项目 (CHIN-ARE2014-01-02, CHINARE2014-04-01); 中国地质调查局地质调查工作项目 (水[2015]02-015-012)

作者简介: 聂森艳 (1990—), 女, 硕士, 主要从事海洋地质学、古环境研究, E-mail: nsy216good@163.com

通讯作者: 王汝建 (1959—), 男, 教授, 主要从事海洋地质学、古海洋学与古气候学研究, E-mail: rjwang@tongji.edu.cn

收稿日期: 2015-04-15; 改回日期: 2015-04-27. 周立君编辑

为冰筏碎屑(Ice Rafted Debris, IRD)。硅藻作为南大洋主要的表层海水生产力组成部分,较好地记录了上层水体的环境信息,其地理分布特征与海水表层温度、海冰范围等密切相关^[17-22],其中 *Fragilariopsis curta* gr. (*Fragilariopsis curta* + *Fragilariopsis cylindrus*, *Fragilariopsis curta* group) 常用于指示海冰浓度的变化^[23]。除此之外,沉积物中的粒度分布是识别沉积物类型和搬运方式的重要工具,同时也是古环境重建的重要手段之一。沉积物粒度组分颗粒大小与水动力相关,粒径特征已经成为洋流强弱变化的重要指标^[24-26]。

本文分析了南极半岛 Bransfield 海峡沉积物中粗颗粒组分、粒度组分及硅藻海冰种等古环境指标,并与周边的古气候记录进行综合对比,其目的是揭示该区域全新世以来的古气候变化及其响应机制。

1 区域环境概况

南极洲被南大洋包围,南大洋最主要的环流为由西风带驱动的环南极洋流(Antarctic Circumpolar Current, ACC)^[27-28]。作用于 ACC 的西风带受气候冷暖环境变化的影响,相应地发生纬向移动^[29],导致特定区域 ACC 水动力的变化,从而影响沉积物粒径大小的分布。在西风带和南极高压区之间有一个低压区,以 65°S 为中心,驱动着狭窄、不连续的向东表层环流,这一环流围绕南极洲沿岸海域,并伴随着稳定且强有力的 Ross 海涡流和 Weddell 海涡流^[28,30]。在环南极沿岸,较温暖的环南极底层水(Circumpolar Deep Water, CDW)上涌,形成上升流,会影响冰盖稳定性及冰川的排泄^[13]。

南极半岛处于南极冰筏排泄通道的边缘^[31-32],同时在冬季海冰和夏季海冰的影响范围之内^[33],对南极冰架变化的响应十分敏感,其陆源沉积物输入受南极半岛冰川稳定性的影响^[34-35]。除此之外,南极半岛还处于火山活动的中心,受火山喷发作用产生的火山碎屑沉积的影响,周边已有较好的火山灰层记录,其中第四纪以来最为活跃的火山喷发中心为 Deception 岛^[36-39]。而环南极流受西风带纬向移动的影响,导致南极半岛底流及环南极底流上部水体(Upper Circumpolar Deep Water, UCDW)的变化,水动力的变化会直接引发沉积物粒径大小的变化。

2 材料与方法

2.1 材料来源

本次研究的材料来源于中国第 28 次南极科学考察在南极半岛 Bransfield 海峡用重力取样器取得的 ANT28-D1-7(此后简称为 D1-7)岩心沉积物(62°16.163'S, 56°35.457'W, 水深 1100 m)(图 1),该岩心总长 307 cm,主要为粉砂质黏土沉积,214~222 cm 为黑色富砂层,界限明显,为火山灰层。此外,显微镜下鉴定发现若干富含火山灰的层位(图 2)。岩心按照 2 cm 间隔取样,共获得 154 个样品。

2.2 研究方法

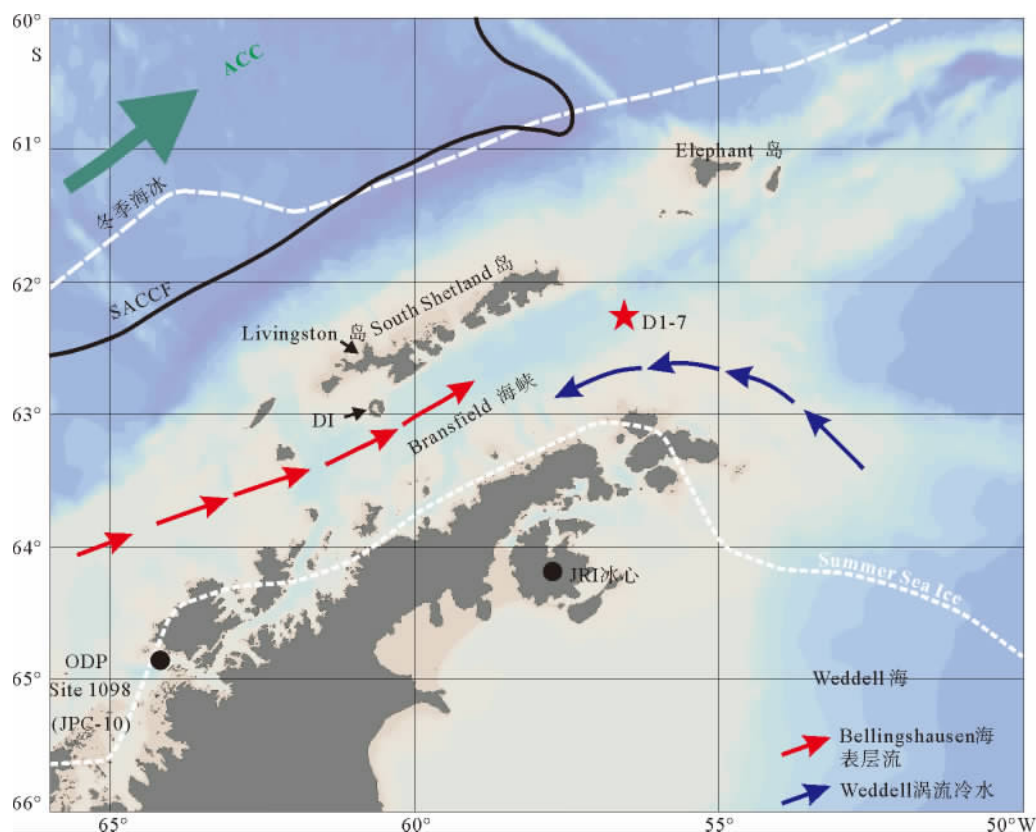
火山灰颗粒统计分析:取适量低温(50 °C)烘干样品置于玻璃烧杯中,加入纯净水、适量双氧水和盐酸,并加热至有机物和碳酸钙反应完全;然后用孔径为 37 μm 的网筛冲洗样品,将筛子上的屑样收集到聚乙烯塑料瓶中,加水定容至 100 mL,摇匀,并用注射器取 5~10 mL,用自然沉降法使颗粒均匀地沉淀在盖玻片上,静置 4 h 以上,沉降完全后用吸水纸条虹吸除去多余水分,自然蒸发晾干后,在 60 °C 加热情况下,待加拿大树胶完全溶解,用其将盖玻片固定在载玻片上。待树胶冷却风干,盖玻片完全固定后,用 Leica 透射显微镜进行火山灰颗粒的统计,计算火山灰丰度。

粗颗粒组分(>63、>150 及 >250 μm)含量测定:将湿样在 50 °C 低温状态下烘干,取 15 g 左右干样,经水泡开,使用孔径为 63 μm 的筛子冲洗,收集筛子里的屑样,自然挥发水分后称重。再将 >63 μm 的屑样依次用孔径为 150 和 250 μm 的筛子干筛,并依次称重。分别得到 >63、>150 和 >250 μm 组分的百分含量。

粒度分析:称取约 0.15 g 低温(50 °C)烘干样品,经双氧水去除有机质、醋酸去除钙质壳体以及用 NaOH 溶液去除生源蛋白石后,加入适量六偏磷酸钠分散剂,煮沸 1 min,使用 Beckman Coulter LS 230 全自动激光粒度分析仪测试粒度。

分选级粉砂(Sortable Silt, SS)特指 10~63 μm 粒径组分,分选级粉砂平均粒径即 10~63 μm 粒径组分加权平均粒径。由于 >10 μm 粒径组分在水体中不发生粘连,10~63 μm 粒径组分经洋流可传输粒径大小与水流流速成正比,因此常用来指示底流流速变化^[25-26,40]。

硅藻样品的处理和制备过程采用德国阿尔弗雷德·魏格纳极地与海洋研究所(Alfred Wegener Institute, AWI)微体古生物室的标准方法^[23],过程如



ACC 为环南极流, SACCF 为环南极流南部峰, DI 为 Deception 岛。邻近的古气候记录分别来自 Palmer Deep ODP Site 1098^[13-14]和 JPC-10^[15], James Ross 岛冰心^[1]

Dark blue arrow: cold Weddell Sea water, red arrow: surface water from the Bellingshausen Sea. ACC: Antarctic Circumpolar Current, SACCF: Southern Antarctic Circumpolar Current Front, and DI: Deception Island. Other cores: ODP Site 1098^[13, 14] and JPC-10^[15] from the Palmer Deep, and James Ross Island ice core^[1]

图 1 南极半岛 Bransfield 海峡 D1-7 岩心及相关记录站位位置以及洋流^[28]和海冰^[33]的分布范围

Fig. 1 Geographic map showing the location of core D1-7 in the Bransfield Basin and reference cores. Oceanographic settings^[28] and sea ice edge^[33] are indicated

下:取足量冻干样品置于 400 mL 烧杯中,加入适量双氧水和盐酸,加热煮沸待其完全反应。加水至 400 mL,静置 8~10 h,虹吸法去除上层水,重复此步骤直至酸和部分黏土去除完全。转移至 50 mL 聚乙烯塑料瓶中,定容至 50 mL,加入 2~3 滴中性甲醛保存。制片前摇匀,用移液枪抽取一定量,移入培养皿,使悬浮液均匀分布。静置沉降后,用吸水纸条通过虹吸去除培养皿中水分,自然晾干。此后将盖玻片用 Mountex 树脂:甲苯=2:1 永久固定在载玻片上。硅藻属种的鉴定主要参考文献资料^[22, 41-46]提供的硅藻模板以及前人整理的南大洋硅藻资料等。由于单个属种 *Chaetoceros* 休眠孢子占硅藻绝对含量极高的百分比,每个样品鉴定的硅藻数量约 600~700 枚个体。本论文仅利用海冰种组合 *Fragilariopsis curta* gr. (*Fragilariopsis curta* + *Fragilariopsis cylindrus*, *Fragilariopsis curta*

group) 来指示海冰变化。

3 地层年代框架

3.1 有机碳和有孔虫的 AMS¹⁴C 测年

南极区域有孔虫较少,而且南极较冷的水体不利于钙质壳的保存^[47-48]。同样, D1-7 沉积物中碳酸钙含量极低,该孔的年代框架如已发表论文^[49]所述,利用 8 个 TOC 和 1 个底栖有孔虫单一属种 (*Bulimina aculeata*) 的 AMS¹⁴C 测年来建立,共得到 9 个 AMS¹⁴C 年龄控制点(表 1)。

AMS¹⁴C 测年原始数据显示 TOC-AMS¹⁴C 年龄明显老于底栖有孔虫单一属种 AMS¹⁴C 年龄,考虑到 TOC-AMS¹⁴C 测年在该区域易受陆源较老有机碳影响,因此必须去除这部分老碳的污染。本研

表 1 南极半岛 Bransfield 海峡 D1-7 岩心的 AMS¹⁴C 年龄数据(有机碳¹⁴C 经过 2 区 100 年老碳污染校正,日历年计算用 Calib7.0.2^[50-51])

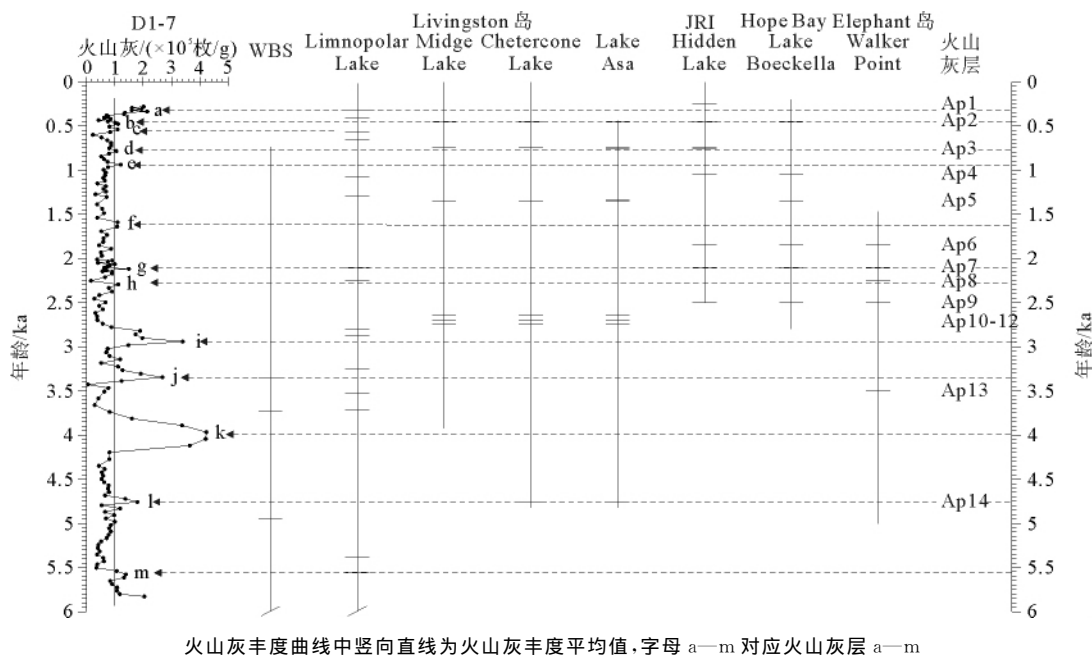
Table 1 AMS¹⁴C and calibrated ages of core D1-7(The ¹⁴C_{org} ages are adjusted by 2 100 yr fossil carbon contamination, Calib7.0.2 was used for calibration^[50-51])

深度/cm	测试材料	¹⁴ C 年龄/a±1σ	老碳污染校正 ¹⁴ C 年龄/a±1σ	碳储库年龄/a	日历年龄/cal. aBP
0~2	有机碳	3 630±30	1 530±30	1 300	278±30
28~30	有机碳	3 840±30	1 740±30	1 300	475±30
80~90	<i>B. aculeata</i>	2 690±40	2 690±40	1 300	1 333±40
98~100	有机碳	5 110±30	3 010±30	1 300	1 691±30
114~116	有机碳	5 380±30	3 280±30	1 300	2 008±30
138~140	有机碳	5 500±30	3 400±30	1 300	2 170±30
204~206	有机碳	6 610±30	4 510±30	1 300	3 506±30
226~228	有机碳	7 240±30	5 140±30	1 300	4 346±30
298~300	有机碳	8 330±40	6 230±40	1 300	5 686±40

究利用 TOC-AMS¹⁴C 测年数据进行插值,得到有孔虫测年对应层位的 TOC-AMS¹⁴C 年龄,其与有孔虫 AMS¹⁴C 年龄的差值即为老碳污染年龄(约为 2.1 ka)。将该差值用来校正岩心顶部沉积物年龄,得到 200 a 左右年龄,为近现代沉积。因此,2.1 ka 的有机碳老碳校正年龄基本可靠。预设老碳污染在全新世恒定,将 8 个 TOC-AMS¹⁴C 年龄统一去除 2.1 ka 的老碳污染。之后再去除该区域的碳储库年龄 1 300 a^[52-53],利用 Calib Rev 7.02 软件和 Marine 13 校正曲线对所有 AMS¹⁴C 年龄进行日历年计算^[50-51],获得 D1-7 岩心的年代框架^[49]。

3.2 火山灰层的区域对比验证 D1-7 年龄模式

显微镜下火山灰统计与分析数据记录显示,以火山灰丰度平均值为界线,出现 13 个大于火山灰丰度平均值的层位,其年龄分别为 0.33、0.47、0.54、0.78、0.93、1.59、2.12、2.29、2.82~2.94、3.34、3.96、4.76 和 5.57 ka,将这 13 个火山灰层用 a—m 标识,均与邻近岩心发现的火山灰层有较好的对应关系(图 2),且推测这些火山灰很有可能来源于邻近火山喷发中心 Deception 岛^[49],由此验证了该岩心年代框架是可靠的。



火山灰丰度曲线中竖向直线为火山灰丰度平均值,字母 a—m 对应火山灰层 a—m

The vertical line at D1-7 represents the mean concentration of tephra. The letters a—m represent the tephra horizons defined in the core

图 2 南极半岛 Bransfield 海峡 D1-7 岩心火山灰层与南极半岛区域火山灰层的对比^[36-39, 48-49]

Fig. 2 Tephra concentration in core D1-7 sediments, compared with detected tephra horizons from 8 different sites in the Antarctic Peninsula region^[36-39, 48-49]

4 结果

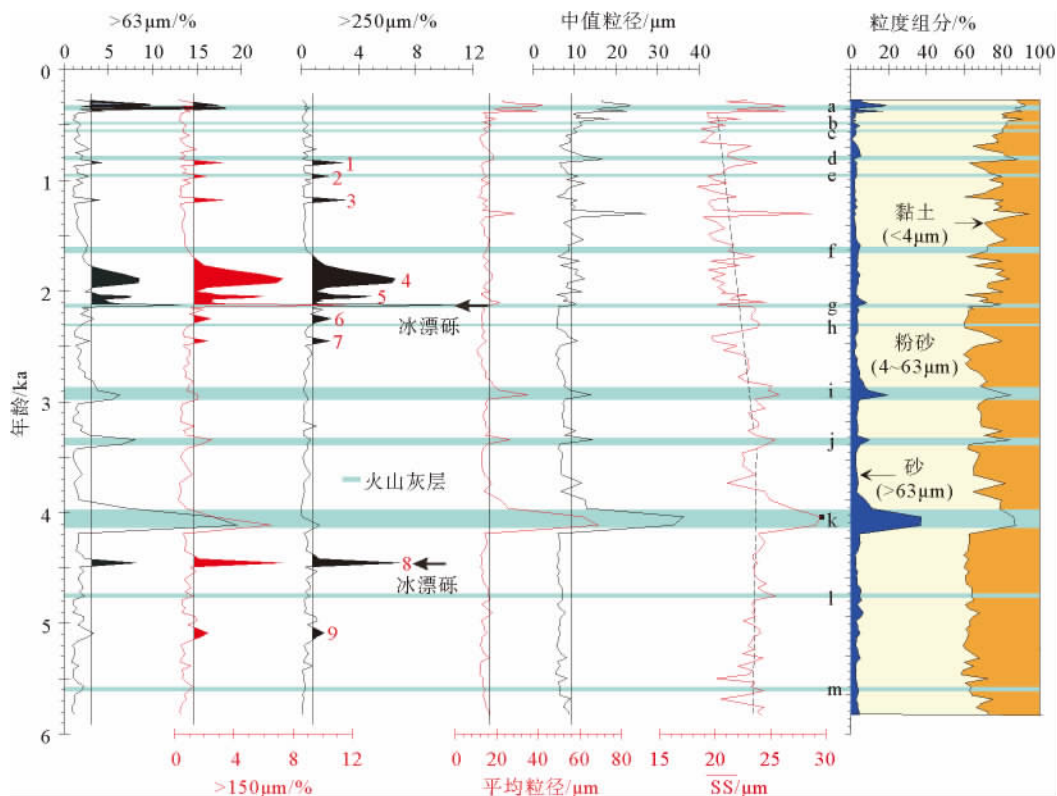
4.1 颗粒组分的变化

南极半岛 Bransfield 海峡 D1-7 岩心沉积物中粗颗粒组分(>63、>150 和 250 μm)分析结果如图 3 所示。>63 μm 组分含量变化范围为 0.8%~19.5%,平均值为 2.7%;>150 μm 组分含量变化范围为 0.2%~11.5%,平均值为 1.3%;>250 μm 组分含量变化范围为 0~10.7%,平均值为 0.8%。这 3 种不同粒径组分变化趋势几乎一致,在 4 个火山灰层 a、i、j 和 k 年龄段都有不同程度的增加。除此之外,在其他火山灰层时间段,这 3 种不同粒径组分的变化不显著,这可能指示了火山灰颗粒较细,火山爆发较弱。排除火山灰层的影响,这 3 个不同粒径的粗颗粒组分含量分别在 0.84、0.97、1.18、1.89、2.05、2.25、2.45、4.46 和 5.09 ka 时间段有所增加,反映了来源于冰川排泄带来的 IRD 的输入,分别标记为 IRD 1—9 事件(图 3)。其中 IRD 1—7 集中于晚全新世。

D1-7 岩心沉积物粒度分析结果显示(图 3),平均粒径变化范围为 10.6~69.1 μm,平均值为 16.4 μm;中值粒径变化范围为 5.6~36.4 μm,平均值为 9.3 μm。平均粒径和中值粒径的变化趋势十分相似,大致与筛选法所得粗颗粒组分的变化相对应,均在较明显的 4 个火山灰层 a、i、j 和 k 时间段粒径变大,尤其是在火山灰层 a 和 k 最为显著。除此之外,中值粒径在 2.5~0.3 ka 期间变化频率增强,出现多处较高值,对应于 IRD 含量在晚全新世的增加。粒度组分划分的黏土(<4 μm)、粉砂(4~63 μm)和砂(>63 μm)组分变化显示,砂组分的高值均出现在火山灰层时间段,除此之外其含量相对稳定;粉砂组分在 4.0~0.3 ka 期间逐渐增加,而黏土组分相应地降低。

4.2 分选级粉砂平均粒径的变化

分选级粉砂平均粒径变化范围为 18.6~29.6 μm,平均值为 22.6 μm,其变化趋势呈现出由基本稳定至缓慢下降的趋势。3.5 ka 以前除去最大火山灰层 k 的影响,该阶段分选级粉砂平均粒径基本稳定,平均值为 23.8 μm;3.5 ka 以来除去较大火山



图中垂直实线显示平均值,虚线显示变化趋势,黑色、红色阴影部分和红色数字标注 IRD 事件

The vertical lines are the mean values of each parameters. The dotted lines show the changing trend. Number 1~9 are defined IRD events

图 3 南极半岛 Bransfield 海峡 D1-7 岩心粗颗粒组分及粒度组分的变化

Fig. 3 Percentage of coarse fractions (>63 μm, >150 μm and >250 μm) and mean grain size, median grain size, mean size of sortable silt and grain composition of core D1-7

灰层 a 的影响,平均粒径呈现下降趋势,平均值下降至 22.0 μm。

4.3 硅藻海冰种含量的变化

D1-7 岩心中硅藻海冰指示种 *F. curta* gr. 统计结果显示(图 4),其含量变化范围为 0.6%~7.1%,平均值为 2.9%。在 5.8~3.5 ka 期间,*F. curta* gr. 总体稳定,平均值较低(2.2%),其中在 5.09 ka 处存在一较高值,达到 3.9%;在 3.5~0.3 ka 期间,*F. curta* gr. 含量较高,平均值达到 3.2%;在 3.5~1.1 ka 期间,*F. curta* gr. 含量较高,振幅增大,1.1 ka 以来 *F. curta* gr. 含量呈现快速升高趋势,达到 6.6%。

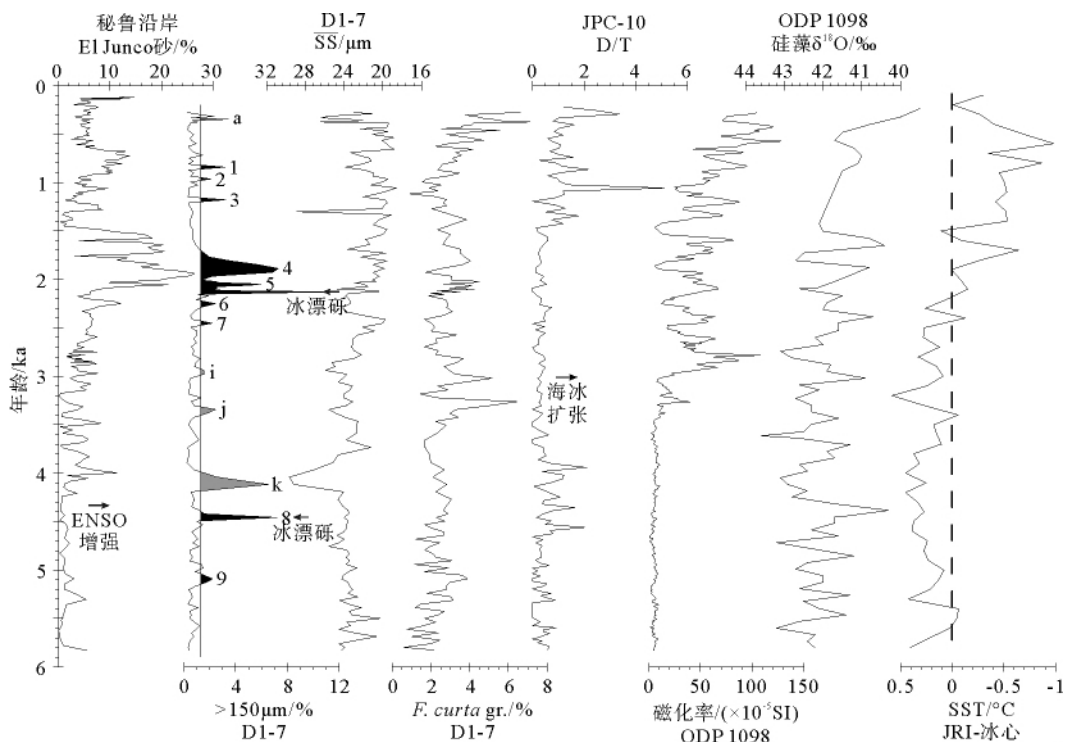
5 讨论

5.1 冰筏碎屑事件及其对 ENSO 的响应

在 5.8~3.5 ka 期间,粗颗粒组分整体较为稳

定,仅出现 3 个高峰,依次指示两次 IRD 事件(IRD 9 和 8)和火山灰层 k(图 4)。IRD 9(5.1 ka)处粗颗粒组分峰值较低,指示此次 IRD 事件相对较弱,IRD 8(4.5 ka)主要来源于一个直径 2 cm 冰漂砾的贡献。除此之外,粗颗粒组分含量没有明显变化,这表明陆源物质输入较少,冰架较为稳定。相比邻近海域 Palmer Deep 的 ODP 1098 站位磁化率在该阶段表现为持续低值^[14],同样表明陆源输入较低;该站位硅藻 δ¹⁸O 值呈现百年尺度的波动,但总体稳定,反映周期性的稳定的冰川排泄^[13]。该时间段 ODP 1098 站位沉积物中主要成分为硅藻软泥^[13,54-55],陆源物质的输入较少,这与该阶段 D1-7 岩心粗颗粒组分含量较低记录一致。总体来说,这个阶段南极半岛海域冰筏较少,反映了冰架的稳定。

在 3.5~0.3 ka 期间,粗颗粒组分出现多个峰值,其中 3 个峰值发生于较大火山灰层 a、i 和 j 时间段;除此之外,粗颗粒组分的高峰指示 7 次 IRD 事件(IRD 1~7),均发生于 2.5 ka 以来,说明粗颗粒组分在此时间段主要表现为冰筏碎屑,且在 2.5 ka



垂直线代表粗颗粒组分(>150 μm)平均含量,字母代表火山灰层,数字 1~9 代表 IRD 1~9。

垂直虚线代表 James Ross 岛冰心站点 1961—1990 间的平均温度

The vertical lines represent the mean percentage of coarse fraction (>150 μm). The number 1~9 represent IRD 1~9 and the letters represent tephra horizon. Dotted line is 1961-1990 mean temperature at the James Ross Island ice-core site as the base line for temperature anomaly

图 4 南极半岛 Bransfield D1-7 岩心粗颗粒组分(>150 μm)、分选级粉砂平均粒径和海冰指示种 *F. curta* gr. 与 JPC-10 岩心^[15]、ODP 1098 站位岩心^[13-14]及 James Ross 岛冰心^[1]的不同指标,以及 ENSO 指标^[56]的对比

Fig. 4 Variations in coarse fraction (>150 μm) content, sea ice diatom *F. curta* gr. relative abundance in core D1-7, compared with Palmer Deep records of core JPC-10^[15] and ODP 1098 in Palmer Deep^[13-14] and James Ross Island ice core temperature record^[1], and sand record (%) from El Junco Lake sediment^[56]

以来,冰筏碎屑输入显著增加,冰川的不稳定性增加。该阶段 D1-7 岩心粗颗粒组分含量的增加与邻近海域 Palmer Deep 的 ODP 1098 站位磁化率信号的显著增强都反映了陆源物质输入增加^[14],并与硅藻 $\delta^{18}\text{O}$ 值变轻反映的表层海水变淡一致,均指示晚全新世以来冰川融化速度加快。这些记录说明晚全新世南极半岛海域冰筏碎屑输入显著增加,冰架处于不稳定期。

D1-7 岩心中的粗颗粒组分含量变化与来自秘鲁沿岸的 El Junco 湖的湖泊沉积物的砂组分含量变化^[57]基本一致(图 4),尤其是晚全新世以来 D1-7 岩心中 IRD 含量的频繁波动很好地对应了 El Junco 湖泊沉积物中砂组分含量的显著增高。这说明南极半岛海域的冰川稳定性与南美气候有潜在的联系。El Junco 湖泊的砂组分含量变化反映了 ENSO 活动的强弱及湖区降水量的变化:在 ENSO 活动增强时,ENSO 活动带来的水汽增多,降水增多,导致湖泊沉积中砂组分的含量增加;反之,ENSO 活动减弱时,降水减少,导致湖泊沉积物颗粒变细。因此,El Junco 湖泊沉积物中砂组分含量的变化显示,ENSO 活动在 3.5 ka 以来显著增强,尤其是 2.5 ka 以来,其中在 2.5~1.5 ka 期间 ENSO 活动最强,对应于 D1-7 岩心中较为显著的 IRD 4-7;在 1.2~0.7 ka 期间 ENSO 活动再次增强,对应于 D1-7 岩心中的 IRD 1-3。ENSO 活动的强弱记录与 D1-7 岩心中粗颗粒组分记录形成很好的遥相关关系。晚全新世以来 ENSO 活动显著增强,向南极半岛输送的水汽增多,进而使得南极半岛冰川不稳定性增强,从而导致该区域 IRD 输入增加。

5.2 海冰和底流对气候变化的响应

在 5.8~3.5 ka 期间,D1-7 岩心中分选级粉砂平均粒径相对较粗,没有明显的变化,仅在最大火山灰层 k 处出现高峰,这表明南极半岛海域底流较强且稳定。该阶段硅藻海冰种 *F. curta* gr. 含量较低,整体稳定,表明该阶段海冰浓度较低,且相对稳定。这与来源于 James Ross 岛的冰心记录显示的该时期大气温度较温暖^[1]相一致(图 4),同时也对应于 ODP 1098 站位较低的磁化率和高硅藻含量所反映的相对温暖的环境^[14,54]。这些记录显示了该阶段南极半岛海域较温暖的气候,海冰浓度较低,底流流速较快。

在 3.5~0.3 ka 期间,D1-7 岩心中分选级粉砂平均粒径除受较大火山灰层 a(0.3 ka)的影响外,整体呈现下降的趋势,这表明该阶段南极半岛海域底

流流速减弱。与此同时,该阶段 D1-7 岩心中硅藻海冰指示种 *F. curta* gr. 含量在 3.5 ka 以来显著增加,指示海冰浓度增高,海冰扩张,与此相对应的是 James Ross 岛冰心记录的大气温度降低^[1]。而且邻近海域 Palmer Deep 的 JPC-10 岩心中硅藻海冰种在晚全新世也显著增加,生物标记物的海冰指标(D/T 指标)升高,都同时指示了海冰的增加^[15]。这些记录表明,该阶段南极半岛海域海冰浓度增加,底流流速减弱。

综合以上分析,D1-7 岩心中的分选级粉砂平均粒径所指示的底流流速和硅藻海冰种 *F. curta* gr. 含量变化所指示的海冰情况都反映了南极半岛海域晚全新世以来的变冷过程。在这个过程中,海冰扩张,导致南大洋高纬海域温度梯度变小,使得西风带北移^[58-59],造成西风带对洋流的驱动力减弱,进而使得底流流速变慢。

6 结论

(1)南极半岛 Bransfield 海峡 D1-7 岩心中可以识别出 13 个火山灰层,分别命名为火山灰层 a—m,其年龄分别为 0.33、0.47、0.54、0.78、0.93、1.59、2.12、2.29、2.82~2.94、3.34、3.96、4.76 和 5.57 ka,它们与该区域其他火山灰层记录有很好的对应关系,验证了该岩心年龄模式的可靠性,推测 D1-7 岩心的火山灰主要来源于其西侧的 Deception 岛。

(2)南极半岛 Bransfield 海峡 D1-7 岩心中的粗颗粒组分包含火山灰和筏冰碎屑等多种信息,除去火山灰信息,从粗颗粒组分中识别出 9 次 IRD 事件,其年龄分别为 0.84、0.97、1.18、1.89、2.05、2.25、2.45、4.46 和 5.09 ka,其中 IRD 1-7 主要集中在 2.5 ka 以来,与 ENSO 替代性指标的对比表明,2.5 ka 以来 IRD 含量的变化响应于 ENSO 的强弱变化,ENSO 活动增强时,表现为南极半岛冰架的不稳定性增加,融化速度加快,冰川的排泄增加。

(3)南极半岛 Bransfield 海峡 D1-7 岩心中的海冰硅藻和分选级粉砂平均粒径的变化与附近相关记录的对比显示,自 3.5 ka 以来,南极半岛 Bransfield 海峡气候变冷,海冰扩张,底流减弱都与西风带的北移有关。

致谢:该项工作是由国家财政部、国家海洋局地办办公室组织实施的“南北极环境综合考察与评估”专项的子专题“南极周边海域海洋地质考察”的一部分,感谢中国第 28 次南极科考队特别是地质工作组全体队员为采集沉积物样品所付出的艰辛努力和

国极地研究中心岩心库提供样品和资料,感谢王磊等对本项研究实验中的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Mulvaney R, Abram N J, Hindmarsh R C, et al. Recent Antarctic Peninsula warming relative to Holocene climate and ice-shelf history[J]. *Nature*, 2012, 489(7414): 141-144.
- [2] Steig E J, Schneider D P, Rutherford S D, et al. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year[J]. *Nature*, 2009, 457(7228): 459-462.
- [3] Steig E J, Orsi A J. Climate Science: The heat is on in Antarctica[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(2): 87-88.
- [4] Steig E J. Climate change: Brief but warm Antarctic summer [J]. *Nature*, 2012, 489(7414): 39-40.
- [5] Luis A J. Past, Present and Future Climate of Antarctica[J]. *International Journal of Geosciences*, 2013, 4(6): 959-977.
- [6] Domack E, Duran D, Leventer A, et al. Stability of the Larsen B ice shelf on the Antarctic Peninsula during the Holocene epoch[J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 681-685.
- [7] Masson V, Vimeux F, Jouzel J, et al. Holocene Climate Variability in Antarctica Based on 11 Ice-Core Isotopic Records[J]. *Quaternary Research*, 2000, 54(3): 348-358.
- [8] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. *Nature*, 1999, 399(6735): 429-436.
- [9] Monnin E, Indermuhle A, Dallenbach A, et al. Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination[J]. *Science*, 2001, 291(5501): 112-114.
- [10] Wolff E W, Fischer H, Fundel F, et al. Southern Ocean sea-ice extent, productivity and iron flux over the past eight glacial cycles[J]. *Nature*, 2006, 440(7083): 491-496.
- [11] Barker S, Diz P, Vautravers M J, et al. Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation[J]. *Nature*, 2009, 457(7233): 1097-1102.
- [12] Barbante C, Barnola J-M, Becagli S, et al. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica [J]. *Nature*, 2006, 444(7116): 195-198.
- [13] Pike J, Swann G E A, Leng M J, et al. Glacial discharge along the west Antarctic Peninsula during the Holocene[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 199-202.
- [14] Domack E, Leventer A, Dunbar R, et al. Chronology of the Palmer Deep site, Antarctic Peninsula: a Holocene palaeoenvironmental reference for the circum-Antarctic[J]. *The Holocene*, 2001, 11(1): 1-9.
- [15] Etourneau J, Collins L G, Willmott V, et al. Holocene climate variations in the western Antarctic Peninsula: evidence for sea ice extent predominantly controlled by changes in insolation and ENSO variability[J]. *Climate of the Past*, 2013, 9(4): 1431-1446.
- [16] Diekmann B, Kuhn G, Rachold V, et al. Terrigenous sediment supply in the Scotia Sea (Southern Ocean): response to Late Quaternary ice dynamics in Patagonia and on the Antarctic Peninsula [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 162(3): 357-387.
- [17] Esper O, Gersonde R. New tools for the reconstruction of Pleistocene Antarctic sea ice[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 399(0): 260-283.
- [18] Esper O, Gersonde R. Quaternary surface water temperature estimations: New diatom transfer functions for the Southern Ocean[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 414: 1-19.
- [19] Esper O, Gersonde R, Kadagies N. Diatom distribution in southeastern Pacific surface sediments and their relationship to modern environmental variables [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 287(1-4): 1-27.
- [20] Crosta X, Romero O, Armand L K, et al. The biogeography of major diatom taxa in Southern Ocean sediments: 2. Open ocean related species[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 223(1-2): 66-92.
- [21] Armand L K, Crosta X, Romero O, et al. The biogeography of major diatom taxa in Southern Ocean sediments: 1. Sea ice related species [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 223(1-2): 93-126.
- [22] Zielinski U, Gersonde R. Diatom distribution in Southern Ocean surface sediments (Atlantic sector): Implications for paleoenvironmental reconstructions [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 129(3-4): 213-250.
- [23] Gersonde R, Zielinski U. The reconstruction of late Quaternary Antarctic sea-ice distribution—the use of diatoms as a proxy for sea-ice[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 162(3-4): 263-286.
- [24] McCave I N, Crowhurst S J, Kuhn G, et al. Minimal change in Antarctic Circumpolar Current flow speed between the last glacial and Holocene[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 7(2): 113-116.
- [25] McCave I N, Hall I R. Size sorting in marine muds: Processes, pitfalls, and prospects for paleoflow-speed proxies[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(10), Q10N05, doi:10.1029/2006GC001284.
- [26] McCave I, Manighetti B, Robinson S. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: parameters for palaeocurrent speed and palaeoceanography [J]. *Paleoceanography*, 1995, 10(3): 593-610.
- [27] Belkin I M, Gordon A L. Southern Ocean Fronts from the Greenwich meridian to Tasmania[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C2): 3675-3696.
- [28] Orsi A H, Whitworth T, Nowlin W D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current[J]. *Deep-Sea Research I*, 1995, 42(5): 641-673.
- [29] Toggweiler J. Shifting westerlies [J]. *Science*, 2009, 323(5920): 1434-1435.
- [30] Orsi A H, Nowlin Jr W D, Whitworth III T. On the circulation and stratification of the Weddell Gyre[J]. *Deep Sea Research*

- search Part I: Oceanographic Research Papers, 1993, 40(1): 169-203.
- [31] Schodlok M, Hellmer H, Rohardt G, et al. Weddell Sea ice-berg drift: Five years of observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C6): 111(C6).
- [32] Anderson J B, Andrews J T. Radiocarbon constraints on ice sheet advance and retreat in the Weddell Sea, Antarctica[J]. *Geology*, 1999, 27(2): 179-182.
- [33] Comiso J C, Cavalieri D J, Markus T. Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2003, 41(2): 243-252.
- [34] Weber M E, Clark P U, Kuhn G, et al. Millennial-scale variability in Antarctic ice-sheet discharge during the last deglaciation[J]. *Nature*, 2014, 510(7503): 134-138.
- [35] ó Cofaigh C, Davies B J, Livingstone S J, et al. Reconstruction of ice-sheet changes in the Antarctic Peninsula since the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 100: 87-110.
- [36] Toro M, Granados I, Pla S, et al. Chronostratigraphy of the sedimentary record of Limnopolar Lake, Byers Peninsula, Livingston Island, Antarctica[J]. *Antarctic Science*, 2013, 25(2): 198-212.
- [37] Willmott V, Domack E W, Canals M, et al. A high resolution relative paleointensity record from the Gerlache-Boyd paleo-ice stream region, northern Antarctic Peninsula[J]. *Quaternary Research*, 2006, 66(1): 1-11.
- [38] Smellie J L. The upper Cenozoic tephra record in the south polar region: a review[J]. *Global and Planetary Change*, 1999, 21(1): 51-70.
- [39] Björck S, Sandgren P, Zale R. Late Holocene tephrochronology of the northern Antarctic Peninsula[J]. *Quaternary Research*, 1991, 36: 322-328.
- [40] 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(13-14): 1291-1303.
- [41] Cefarelli A O, Ferrario M E, Almandoz G O, et al. Diversity of the diatom genus *Fragilariopsis* in the Argentine Sea and Antarctic waters: morphology, distribution and abundance[J]. *Polar Biology*, 2010, 33(11): 1463-1484.
- [42] Geary L E. Holocene diatoms recovered from SHALDRIL Cores, Maxwell Bay, Antarctica: [D]. Berkeley: Florida State University, 2007.
- [43] Almandoz G O, Ferreyra G A, Schloss I R, et al. Distribution and ecology of *Pseudo-nitzschia* species (Bacillariophyceae) in surface waters of the Weddell Sea (Antarctica)[J]. *Polar Biology*, 2007, 31(4): 429-442.
- [44] Zielinski U, Gersonde R. Plio-Pleistocene diatom biostratigraphy from ODP Leg 177, Atlantic sector of the Southern Ocean[J]. *Marine Micropaleontology*, 2002, 45(3): 225-268.
- [45] Armand L K, Zielinski U. Diatom species of the genus *Rhizosolenia* from Southern Ocean sediments: Distribution and taxonomic notes[J]. *Diatom Research*, 2001, 16(2): 259-294.
- [46] Iwai M, Winter D. Data Report: Taxonomic Notes of Neogene Diatoms from the Western Antarctic Peninsula: Ocean Drilling Program Leg 178 [C]//Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 178. College Station TX: Texas A&M University, 2002: 1-57.
- [47] Diekmann B. Sedimentary patterns in the late Quaternary Southern Ocean[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54(21-22): 2350-2366.
- [48] Heroy D C, Sjunneskog C, Anderson J B. Holocene climate change in the Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: evidence from sediment and diatom analysis[J]. *Antarctic Science*, 2008, 20(1): 69-87.
- [49] 聂森艳, 王汝建, 肖文申. 南极半岛 Bransfield 海峡 6000 年以来的陆源组分记录及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(3): 590-599. [NIE Senyan, WANG Rujian, XIAO Wenshen. A 6000-year record of terrigenous components from the Bransfield Strait, Antarctic Peninsula: responses to climate change[J]. *Quaternary Science*, 2014, 34(3): 590-599.]
- [50] Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program[J]. *Radiocarbon*, 1993, 35: 215-230.
- [51] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal. BP[J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [52] Gordon J E, Harkness D D. Magnitude and geographic variation of the radiocarbon content in Antarctic marine life- Implications for reservoir corrections in radiocarbon dating[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1992, 11(7): 697-708.
- [53] Berkman P A, Forman S L. Pre-Bomb Radiocarbon and the Reservoir Correction for Calcareous Marine Species in the Southern Ocean[J]. *Geophysical Research Letter*, 1996, 23(4): 363-366.
- [54] Leventer A, Domack E, Barkoukis A, et al. Laminations from the Palmer Deep: A diatom-based interpretation[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): PAL 3-1-PAL 3-15.
- [55] Taylor F, Sjunneskog C. Postglacial marine diatom record of the Palmer Deep, Antarctic Peninsula (ODP Leg 178, Site 1098) 2. Diatom assemblages[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): PAL 2-1-PAL 2-12.
- [56] Conroy J L, Overpeck J T, Cole J E. El Niño/Southern Oscillation and changes in the zonal gradient of tropical Pacific sea surface temperature over the last 1.2 ka [J]. *Pages News*, 2010, 18(1): 32-33.
- [57] Conroy J L, Overpeck J T, Cole J E, et al. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(11): 1166-1180.
- [58] Voigt I, Chiessi C M, Prange M, et al. Holocene shifts of the Southern Westerlies across the South Atlantic[J]. *Paleoceanography*, 2015.

[59] Lamy F, Kilian R, Arz H W, et al. Holocene changes in the position and intensity of the southern westerly wind belt[J].

Nature Geoscience, 2010, 3(10): 695-699.

PALAEOCLIMATIC CHANGES OF THE BRANSFIELD STRAIT, ANTARCTIC PENINSULA SINCE 6 kaBP, AND THE TELE-CONNECTION WITH ENSO

NIE Senyan, XIAO Wenshen, WANG Rujian

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The Antarctic Peninsula is one of the most sensitive areas to recent global warming. The Holocene climatic variation in this area is a key to the understanding of the mechanism of climate changes in the high latitude Southern Ocean. In this study, multiple proxies, such as tephra concentration, content of coarse fractions, grain size, sea ice related diatoms, have been studied for the core D1-7 collected at the Bransfield Strait, Antarctic Peninsula region, during the 28th Chinese National Antarctic Expedition, aiming to learn more about Holocene climatic variation in the Antarctic Peninsula region since the 6 ka. Thirteen tephra-bearing layers are identified, which can be regionally correlated and were possibly coming from the Deception Island. Nine Ice Rafted Debris events (IRD 1—9: 0.84, 0.97, 1.18, 1.89, 2.05, 2.25, 2.45, 4.46 and 5.09 ka) were identified. Frequent IRD events during the late Holocene, especially since 2.5 ka, are tele-connected to the enhanced ENSO variability during this interval, which brings more moisture to the Antarctic Peninsula region and causes the instability of ice shelf. Since 3.5 ka, the increase in the sea ice species of diatom along with the decrease of mean grain size of sortable silt suggested the expansion of sea ice and the weakening of bottom current. These data further suggest the late Holocene cooling of the study area, incorporated with northward shift of the Westerly.

Key words: ice discharge; sea ice; bottom current; ENSO; Antarctic Peninsula