

冯宗保, 陈志华, 杨春丽, 等. 末次冰期以来南极斯科舍海东南部沉积物来源与环境变化[J]. 海洋学报, 2023, 45(7): 56–68, doi:10.12284/hyxb2023105

Feng Zongbao, Chen Zhihua, Yang Chunli, et al. Sediment provenances and environmental changes in the southeastern Scotia Sea, Antarctica, since the Last Glaciation[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(7): 56–68, doi:10.12284/hyxb2023105

末次冰期以来南极斯科舍海东南部 沉积物来源与环境变化

冯宗保^{1,2}, 陈志华^{1,2*}, 杨春丽³, 黄元辉¹, 崔迎春⁴, 唐正^{1,2}, 刘焱光^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061; 3. 山东省煤田地质局第一勘探队, 山东 青岛 266500; 4. 中国极地研究中心, 上海 200136)

摘要: 本文通过南极斯科舍海东南部海域 DC-11 岩芯稀土元素 (REE) 特征及其与生源硅 (BSiO₂)、磁化率、Al₂O₃、Fe₂O₃ 的耦合关系, 深入探讨了 34 ka BP 以来研究区沉积物的来源及冰山-海流-大气搬运历史。结果表明, DC-11 岩芯沉积物 REE 含量变化与 Al₂O₃ 相似, 主要赋存于陆源碎屑之中, BSiO₂ 对其有明显稀释效应。末次冰期 REE 含量高, 页岩标准化模式平坦, Eu 正异常弱, La_N/Yb_N 比值较大, 沉积物主要来源于地壳相对较老的威德尔海周边地区, 磁化率、 Δ Al₂O₃、TFe₂O₃/Eu 比值证实该时期沉积物中南美风尘物质多。冰消期早期 (19.6~14.1 ka BP) 气候快速回暖, 西风带与海洋锋面南移, 南美风尘输入迅速减弱, 南极绕极流南部分支增强, 导致南设德兰群岛-南极半岛的冰山及沉积物向东搬运至研究区, 沉积物 Eu 正异常明显, La_N/Yb_N 比值小, 磁化率、 Δ Al₂O₃、TFe₂O₃/Eu 比值降低。南极冷倒转期 (14.1~12.9 ka BP), 南极气温明显下降, 海洋锋面小幅北移, 来自南设德兰群岛-南极半岛沉积物减少, 威德尔海沉积物在岩芯中占主导, 沉积物 Eu 正异常弱, La_N/Yb_N 比值接近于 1, 冰筏碎屑含量高; 冰消期晚期 (12.9~11.7 ka BP) 海洋锋面再次南移, 南设德兰群岛-南极半岛海域南极绕极流分量增强, 对 DC-11 岩芯沉积物贡献加大; 全新世 (11.7~0 ka BP) 气候温暖, 南设德兰群岛-南极半岛海域南极绕极流分量总体增强, 对岩芯沉积物贡献加大, 与来自威德尔海的沉积物量大体相当。

关键词: 南极; 斯科舍海; 稀土元素; 沉积物来源; 环境变化

中图分类号: P728.2; P736.21⁺²

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)07-0056-13

1 引言

斯科舍海位处南美洲和南极半岛、东南太平洋和西南大西洋之间, 构造背景与沉积环境复杂^[1-4]。自西向东的南极绕极流 (ACC) 和顺时针方向运动的威德尔海环流在此交汇, 使得威德尔海、大西洋、太平洋之间的物质和能量交换活跃, 对全球大洋循环和气候

变化具有重要影响^[2,5]。与此同时, 高纬度地区特殊的冰-海-气相互作用使得沉积物的搬运方式多样、来源广泛、组成复杂、受控因素多^[6-8], 沉积记录的多解性问题突出。近年来, 越来越多的研究发现, 斯科舍海岩芯沉积物的磁化率与南极冰芯风尘记录之间具有很好的对应关系, 它不仅被用来确定岩芯的年代框架^[9-12], 同时被用来揭示与风尘有关的生物地球化

收稿日期: 2022-12-17; 修订日期: 2023-01-15。

基金项目: 南极重点海域对气候变化的响应与影响 (IRASCC2020-2022-01-03, 02-03); 国家自然科学基金 (41676191)。

作者简介: 冯宗保 (1997—), 男, 广东省茂名市人, 主要从事南极海洋地质学研究。E-mail: w15817895204@163.com

* 通信作者: 陈志华, 男, 研究员, 主要从事地球化学与极地海洋地质学研究。E-mail: chenizia@fio.org.cn

学过程^[13],但是迄今尚未有明显的证据表明这些岩芯中存在风尘沉积,且风尘沉积决定了磁化率的变化,Shin等^[14]的一项研究甚至提供了该地区沉积物磁化率主要来源于冰筏碎屑而非风尘的反证。本文针对研究区沉积物可能受冰山、海流和大气搬运的特点,通过DC-11岩芯稀土元素与邻区海洋沉积物、潜在源区沉积物的广泛对比,以及稀土元素与磁化率、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的耦合关系,深入解析了末次冰期以来该地区陆源碎屑沉积物的来源、搬运路径及其演变历史。

2 区域背景

斯科舍海西接德雷克海峡,是冈瓦纳大陆分裂最

后阶段在南极半岛和南美洲之间形成的一个海盆;它南面为南斯科舍海脊、东面为南桑德威奇群岛、北面为南佐治亚群岛-北斯科舍海脊所环抱,其间海底地形起伏,分布着一系列的小海盆和海底浅滩^[4,15]。

DC-11岩芯采集于斯科舍海东南部布鲁斯浅滩(Bruce Bank)与发现浅滩(Discovery Bank)之间的布鲁斯海道(Bruce Passage)。如图1所示,研究区位处南极极锋以南,南半球夏季海冰线以北,常年盛行西风^[11]。来自威德尔海的深层水部分通过布鲁斯海道进入斯科舍海,随后汇入南极绕极流;部分绕过南奥克兰群岛,沿南斯科舍海脊西流进入太平洋^[2,15-16]。与此同时,受西风驱动的反极绕极流(ACC)经德雷克海

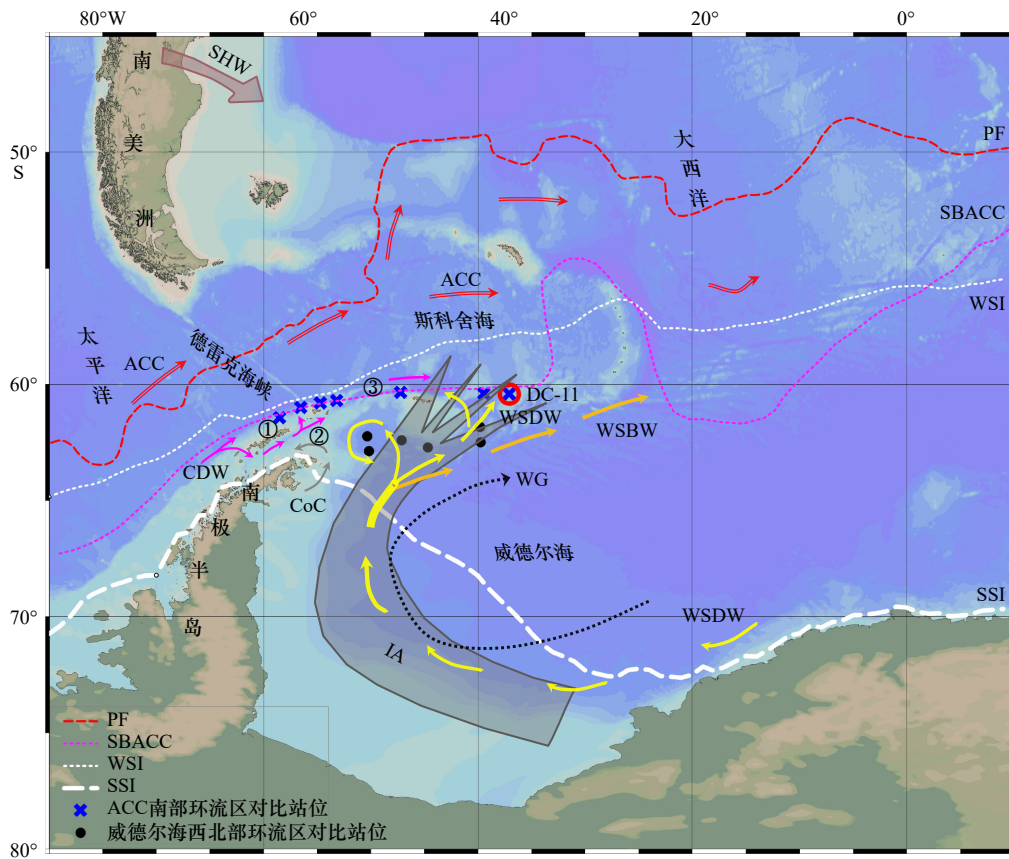


图1 斯科舍海地形图及站位、环流分布(据文献[2,15-19])

Fig. 1 Physiographic map of the Scotia Sea showing sample positions and marine circulation (by references [2, 15-19])

SHW(灰色箭头): 南半球西风带; PF(红色虚线): 极锋; ACC(红色箭头): 南极绕极流; CDW(粉红色箭头): 绕极深层水; SBACC(粉红色虚线): 南极绕极流南边界; WG(黑色虚线箭头): 威德尔涡流; WSBW(橘色箭头): 威德尔海底层水; WSDW(黄色箭头): 威德尔海深层水; WSI(白色细虚线)和 SSI(白色粗虚线): 南半球冬季和夏季海冰线; IA(灰色条带): 冰山通道; CoC(灰色箭头): 沿岸流; ①南设德兰群岛; ②布兰斯菲尔德海峡; ③南斯科舍海脊

SHW (gray arrow): the dominant direction of the Southern Hemisphere Westerlies; PF (red dashed line): the Polar Front; ACC (red arrow): the Antarctic Circumpolar Current; CDW (pink arrow): the Circumpolar Deep Water; SBACC (pink dotted line): the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current; WSBW (brown arrow): the Weddell Sea Bottom Water; WSDW (yellow arrow): the Weddell Sea Deep Water; WG (black dotted arrows): the Weddell Gyre; WSI (white fine dotted line) and SSI (white thick dashed line): the austral winter and summer sea ice limits, respectively; IA (gray belt): the iceberg alley;

CoC (gray arrow): coastal current; ① South Shetland Islands; ② Bransfield Strait; ③ South Scotia Ridge

峡向东进入斯科舍海,主流逐渐北移,其南边界(SBACC)则沿着南设德兰群岛-南斯科舍海脊向东通过研究区^[17-19](图 1)。来自南极半岛和威德尔海的物质使得该地区营养盐丰富,现代海洋生产力高^[20-21]。第四纪冰期-间冰期海洋锋面、西风带、海冰的迁移及南极冰盖的消长制约着该地区沉积环境的演化^[13, 22-23],复杂的海底地形地貌与底流导致沉积物分布不均匀,垂向上经常不连续^[1-3, 8]。

3 样品与方法

3.1 岩芯与年代框架

DC-11 岩芯是 2017-2018 年“向阳红 01”号船通过中国第 34 次南极考察航次获取的重力岩芯。该岩芯采自斯科舍海东南部陆隆区(60°24'39.340"S, 37°04'52.356"W), 取样水深为 2 162 m, 分析样品长度为 256 cm。岩芯大致分 3 层: 下部(256~195 cm)为灰色含硅质黏土, 中部(195~117 cm)为绿灰色硅质黏土, 上部(117~0 cm)为黄绿色黏土硅质软泥, 硅藻较为丰富, 未见有孔虫等钙质生物屑。岩芯底部日历年龄为 34 ka BP, 详细年代框架见文献^[23]。

3.2 样品化学分析

样品化学分析在自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室完成。生源硅(BSiO₂)采用 1 mol/L 的氢氧化钠溶液(NaOH)提取, 用钼蓝比色法测定, 相对分析精度优于 2%。Al₂O₃、TFe₂O₃ 通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定, 相对标准偏差 RSD < 5%。稀土元素(REE)通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, X-series II)测定; 仪器对稀土元素的检出限为 10⁻⁹, 相对标准偏差小于 5%。

稀土元素统计分 3 组: La、Ce、Pr、Nd 为轻稀土, 用 LREE 表示; Sm、Eu、Gd、Tb、Dy 为中稀土, 用 MREE 表示; Ho、Er、Tm、Yb、Lu 为重稀土, 用 HREE 表示。采用澳大利亚后太古代页岩平均值(PAAS)对稀土元素进行标准化^[24], 按如下公式计算出铈异常(δCe)、铕异常(δEu)和轻重稀土比值(LREE_N/HREE_N):

$$\delta\text{Ce} = \text{Ce}_N / (\text{La}_N \times \text{Pr}_N)^{1/2}, \quad (1)$$

$$\delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}, \quad (2)$$

$$\text{LREE}_N / \text{HREE}_N = (\text{La}_N, \text{Ce}_N, \text{Pr}_N, \text{Nd}_N)_{\text{平均值}} / (\text{Ho}_N, \text{Er}_N, \text{Tm}_N, \text{Yb}_N, \text{Lu}_N)_{\text{平均值}}, \quad (3)$$

式中, N 代表 PAAS 标准化^[24]。

4 结果与讨论

4.1 岩芯主要化学成分与稀土元素组成

如图 2b 至图 2d 所示, DC-11 岩芯 REE 含量的变

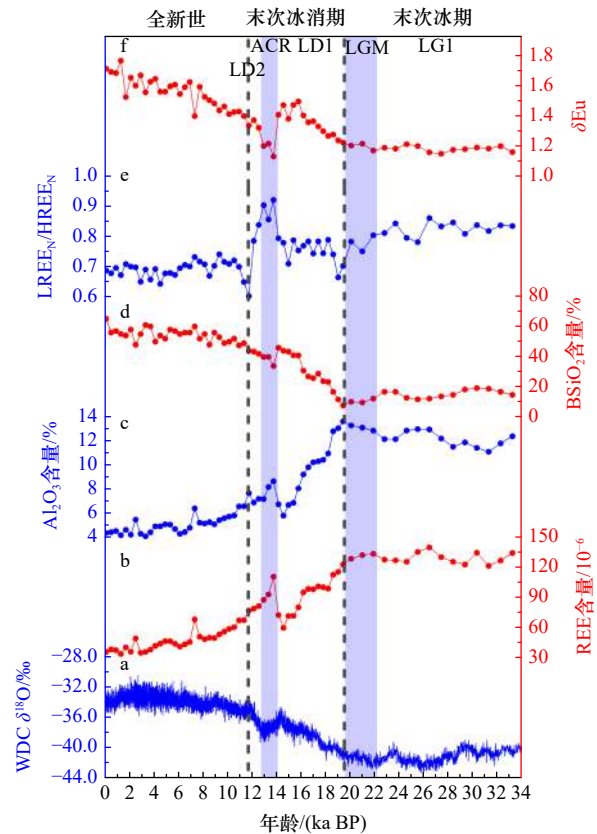


图 2 DC-11 岩芯稀土元素(REE)含量及特征参数变化
Fig. 2 Concentration and characteristic parameters of rare earth elements (REE) in Core DC-11

a. 西南极冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[25]; b. DC-11 岩芯 REE 含量; c. Al₂O₃ 含量; d. BSiO₂ 含量; e. LREE_N/HREE_N; f. δEu
a. $\delta^{18}\text{O}$ from West Antarctica ice core WDC^[25]; b. REE content of Core DC-11; c. Al₂O₃ content; d. BSiO₂ content; e. LREE_N/HREE_N; f. δEu

化与 Al₂O₃ 相似, 与 BSiO₂ 含量变化相反; 它们随南极温度的变化(图 2a)^[25]大致可分为末次冰期(LG)、末次冰消期(LD)和全新世(H)3 个阶段。岩芯及各分段稀土元素含量及特征参数统计见表 1。岩芯 REE 含量介于 $34.81 \times 10^{-6} \sim 140.79 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 82.09×10^{-6} , 与南极半岛东北侧的布兰斯菲尔德海峡表层沉积物相当^[26], 低于深海黏土^[27]和澳大利亚后太古代页岩平均值(PAAS)^[24], 高于深海硅藻^[28], 体现出南极大陆边缘富硅藻冰海沉积物的特点。

从垂向分布来看(图 2b 至图 2d), 末次冰期(33.9~19.6 ka BP)REE 含量高, 平均值达 131.02×10^{-6} ; 随南极温度的变化略有起伏, 但变幅不大, 高值出现在 28~24 ka BP 和 22~19.6 ka BP(LGM), 与 Al₂O₃ 含量的高值和 BSiO₂ 含量的低值相对应。末次冰消期(19.6~11.7 ka BP)REE 含量呈现出千年尺度的快速变化。冰消期早期(19.6~14.1 ka BP, LD1), 随着南极气温的快速上升, REE 含量从 123.98×10^{-6} 下降至 $60.83 \times$

表1 DC-11岩芯稀土元素含量、特征值统计与对比(稀土元素含量: $\times 10^{-6}$)Table 1 Statistics and comparison for concentrations and characteristic parameters of rare earth elements (REE) in Core DC-11 (REE concentrations: $\times 10^{-6}$)

样品	参数	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	δCe	δEu	$LREE_N/HREE_N$
DC-11岩芯 ($n=64$)	最小值	6.52	14.24	1.62	6.19	1.24	0.43	1.16	0.20	1.22	0.24	0.73	0.11	0.76	0.13	34.81	0.97	1.13	0.73
	最大值	27.88	59.68	6.75	25.22	4.97	1.22	4.58	0.74	4.47	0.88	2.59	0.40	2.62	0.41	140.79	1.08	1.77	1.11
	变异系数	0.45	0.44	0.45	0.44	0.43	0.32	0.42	0.42	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.37	0.44	0.02	0.13	0.09
	平均值	15.29	33.83	3.83	14.75	2.91	0.79	2.67	0.44	2.65	0.53	1.52	0.24	1.56	0.25	81.24	1.02	1.40	0.90
DC-11岩芯 分段平均值	H ($n=29$)	8.82	19.81	2.24	8.70	1.74	0.55	1.62	0.27	1.65	0.33	0.97	0.15	1.01	0.17	48.01	1.03	1.56	0.84
	LD2 ($n=3$)	14.86	32.66	3.83	14.85	2.96	0.81	2.70	0.45	2.73	0.55	1.57	0.25	1.58	0.26	80.06	1.00	1.35	0.90
	ACR ($n=3$)	18.98	41.19	4.76	18.18	3.48	0.81	3.04	0.48	2.87	0.56	1.59	0.25	1.63	0.26	98.08	1.00	1.18	1.08
	LD1 ($n=14$)	17.47	38.89	4.40	17.10	3.38	0.93	3.14	0.51	3.13	0.62	1.77	0.28	1.83	0.29	93.75	1.02	1.36	0.91
	LGM ($n=3$)	25.17	55.10	6.27	23.97	4.77	1.16	4.34	0.71	4.33	0.85	2.46	0.38	2.48	0.40	132.38	1.01	1.20	0.94
	LG1 ($n=12$)	25.09	54.92	6.19	23.42	4.57	1.09	4.12	0.67	4.02	0.79	2.29	0.36	2.32	0.37	130.23	1.02	1.18	1.00
布兰斯菲尔德海峡 表层沉积物 ($n=4$) ^[26]	16.42	36.00	4.92	20.70	4.89	1.27	5.24	0.80	5.12	1.08	3.07	0.41	3.14	0.43	103.49	0.93	1.17	0.61	
澳大利亚后太古代页岩 ^[24]	38.20	79.58	8.83	33.90	5.55	1.08	4.65	0.78	4.68	0.99	2.84	0.41	2.82	0.44	184.75		1.00	1.00	
南大西洋巴西 海盆黏土($n=7$) ^[27]	48.53	150.71	12.65	46.37	10.18	2.35	9.78	1.32	8.20	1.54	4.25	0.59	3.99	0.58	301.06	1.42	1.11	1.32	
南印度洋硅藻 ^[28]	5.77	8.21		6.71	1.56	0.404	1.78		1.69		0.998		0.859		27.98				
ACC南部环流区 沉积($n=7$) ^[29]	15.14	32.14	4.02	16.23	3.48	0.98	3.11	0.55	3.39	0.67	1.96	0.31	1.96	0.32	84.25	0.96	1.43	0.62	
威德尔海西北部 环流区沉积($n=6$) ^[29]	28.67	61.24	7.18	26.99	5.18	1.20	4.55	0.74	4.43	0.84	2.43	0.39	2.44	0.39	146.69	0.98	1.18	0.88	
铁锰氧化物 ^[30]	161	826	36.7	152	32.7	8.06	39.2	6.2	32.9	6.12	16.6	2.53	15.4	2.22	1337.63	2.48	1.06	1.01	
大西洋沉积有机质 ^[30]	19.10	49.00	5.35	20.80	4.09	0.85	3.45	0.48	2.64	0.49	1.30	-	1.11	0.15	108.81	1.12	1.06		
南设德兰群岛长城站 土壤/湖泊沉积物($n=10$) ^[29]	8.74	21.24	2.95	13.40	3.31	1.12	2.82	0.52	3.25	0.63	1.80	0.28	1.78	0.29	62.13	0.97	1.78	0.57	
东南极湖泊沉积($n=4$) ^[31]	34.60	77.15	7.75	31.35	5.31	1.33	4.02	0.66	3.98	0.66	2.16	0.31	1.67	0.26	171.21	1.08	1.36	1.65	
巴塔哥尼亚黄土($n=7$) ^[32]	23.87	49.34	6.50	23.34	4.78	1.12	4.20	0.64	3.70	0.76	2.09	0.34	2.19	0.32	123.20	0.91	1.18	1.05	

10^{-6} , 对应 Al_2O_3 含量从 13.69% 下降至 5.87%, $BSiO_2$ 含量从 8.03% 上升至 46.30%。然后, 随着南极气温回落进入南极冷倒转期(14.1~12.9 ka BP, ACR), 岩芯 REE 和 Al_2O_3 含量明显抬升, 出现显著峰值; $BSiO_2$ 含量降低, 出现小波谷。冰消期晚期(12.9~11.7 ka BP, LD2), 南极气温再次上升, 岩芯 REE 和 Al_2O_3 含量下降, $BSiO_2$ 含量升高。全新世(11.7~0 ka BP)岩芯 REE($34.81 \times 10^{-6} \sim 69.11 \times 10^{-6}$)和 Al_2O_3 含量(4.16%~6.65%)低, 向上呈缓慢下降趋势; $BSiO_2$ 含量高(47.81%~65.43%), 向上呈平缓上升态势。

以 $BSiO_2$ 含量代表硅质生物屑, 6.4 倍的 Al_2O_3 代表陆源碎屑含量(上地壳平均值^[24]), 前者占 DC-11 岩芯沉积物质量的 8.04%~65.49%, 后者占 26.61%~

87.63%, 两者之和占 81.9%~101.8%, 平均值达 90.1%, 可见岩芯总体以硅质生物屑和陆源碎屑为主, 硅质生物屑贫稀土。据有限报道, 硅藻的 REE 含量为 28×10^{-6} ^[28], 约占岩芯平均值的 1/3。如图 3 所示, 岩芯 REE 含量与 $BSiO_2$ 呈显著负相关($R^2 = 0.94$), 与 Al_2O_3 含量呈显著正相关($R^2 = 0.96$), 可见 REE 主要赋存于陆源碎屑组分之中, 而 $BSiO_2$ 对它们有明显的稀释效应。

4.2 岩芯稀土元素页岩标准化模式与对比

海洋沉积物稀土元素页岩标准化模式是稀土元素成因的综合反映^[29]。如图 4 所示, 岩芯各层段的页岩标准化曲线大致平行, 多富集重稀土($LREE_N/HREE_N$ 介于 0.73~1.11 之间), Eu 正异常明显(δEu 值介于 1.13~1.77 之间), 无 Ce 异常(δCe 值介于 0.97~1.08

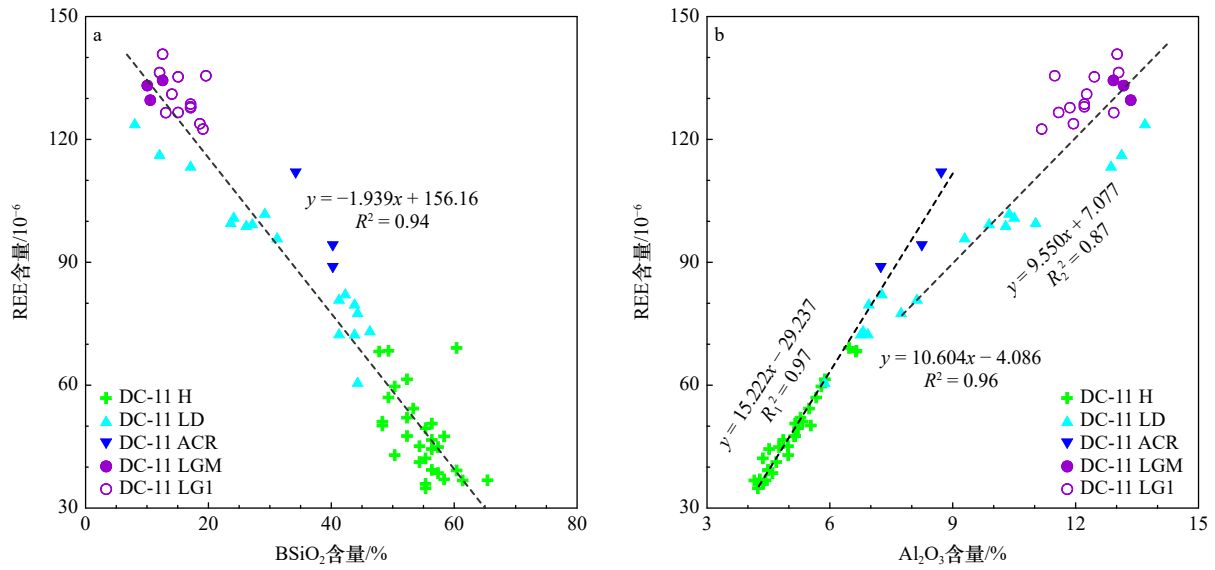


图 3 DC-11 岩芯稀土元素(REE)含量与 $BSiO_2$ 、 Al_2O_3 含量相关图

Fig. 3 Correlations between rare earth elements (REE) content and $BSiO_2$ content, Al_2O_3 content in Core DC-11

之间), 总体上呈现出陆源碎屑的主控作用和 $BSiO_2$ 的稀释效应。

Ce 的负异常是硅藻等生源组分的显著特征之一^[28, 33], 如图 4a 所示, DC-11 岩芯沉积物虽然含有一定量的硅藻, 但其页岩标准化模式缺失 Ce 负异常。考虑到硅藻可能对沉积物全样的稀土配分模式有一定影响, 推测沉积物中可能存在某种或某几种具 Ce 正异常的物质来抵消硅藻的 Ce 负异常效应。海洋沉积物中常见的 Ce 正异常组分是铁锰氧化物-氢氧化物, 它可以以结核-结壳、沉积物包裹膜等形式存在, 对海水中的稀土元素特别是 Ce(IV) 离子及其水解产物具有很强的清扫效应, 因而表现出稀土富集、Ce 正异常显著(δCe 值达 2.5)的特点(图 4a 和表 1)^[28, 30, 33]。

如图 4a 所示, DC-11 岩芯沉积物的稀土含量介于硅藻和自生铁锰氧化物之间, 既没有硅藻的 Ce 负异常, 也没有铁锰氧化物的 Ce 正异常, 不排除少量铁锰氧化物-氢氧化物的存在抵消了硅藻的 Ce 负异常。过去, 人们认为海洋沉积有机质为 Ce 负异常, 但新近发现在大西洋部分海域沉积有机质也表现出弱 Ce 正异常(图 4a)^[30]。有机质对稀土元素具有很强的吸附能力^[34], 在特定条件下对水体中的 Ce(IV) 离子及其水解产物表现出与铁锰氧化物-氢氧化物相似的优先吸附特征^[35]。DC-11 岩芯沉积物中有机质以硅藻壳体包裹的海源有机质为主, 与 $BSiO_2$ 同源性明显^[23], 不排除在沉降过程中部分硅藻壳体溶解, 导致有机质被释放, 在沉降过程中优先吸附 Ce(IV) 离子或水解产物,

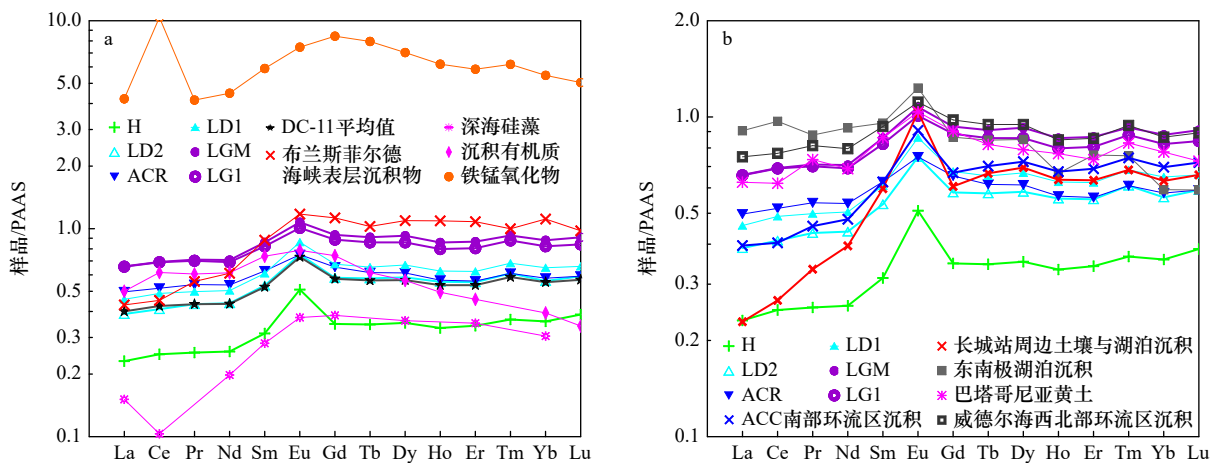


图 4 DC-11 岩芯不同层段稀土元素 PAAS 标准化曲线及相关物源对比

Fig. 4 PAAS-normalized rare earth elements patterns at different intervals in Core DC-11 and comparisons with related provenances

数据来源及出处见表 1

The data and references are shown in Table 1

从而形成具弱 Ce 正异常的有机端元, 并有效抵消了硅藻壳体的 Ce 负异常影响。

从上述分析来看, 生源组分和自生组分对 DC-11 岩芯沉积物稀土页岩标准化模式的整体影响不明显, 沉积物全样的页岩标准化模式或元素比值为陆源碎屑的成因解析提供了基础。如图 4b 所示, DC-11 岩芯全新世沉积物与南极半岛北侧海/陆沉积物包括长城站周边土壤与湖泊沉积物^[29]、布兰斯菲尔德海峡沉积物^[26]和南设德兰群岛-南斯科舍海脊一带 ACC 南部环流区沉积物相似, 表现出明显的轻稀土亏损和 Eu 正异常。Eu 在风化和早期成岩作用过程中通常不发生迁移^[24, 36], 它在布兰斯菲尔德海峡及南设德兰群岛北部岛架-岛坡沉积物中的正异常与该地区中-新生代火山岩的发育有关^[29]。末次冰期沉积物与威德尔海西北部环流区沉积物^[29]、东南极湖泊沉积物 (71.347°S, 13.440°E)^[31]、南美巴塔哥尼亚黄土地^[32]相似, 它们的稀土曲线趋于平坦, 轻稀土含量明显抬升, Eu 正异常较弱。末次冰消期沉积物介于全新世和末次冰期沉积物之间; 其中, 末次冰消期早期(LD1)与晚期(LD2)稀土曲线大致平行, 与 ACR 期沉积物相比, 它们的轻稀土明显亏损, Eu 正异常也更显著(图 4)。从垂向分布来看, DC-11 岩芯 LREE_N/HREE_N 比值以 ACR 最高, 末次冰期次之, 全新世沉积物最低(图 2e)。δEu 值变化明显, 末次冰期一直在 1.2 左右, 冰消期早期迅速增大, 至 ACR 期又突然变小, 冰消期晚期至全新世逐渐变大(图 2f)。

4.3 岩芯陆源碎屑来源及环境解释

陆源碎屑沉积物主要来源于周边大陆和岛屿。如图 5a 所示, DC-11 岩芯沉积物的 La/Y、Sm/Nd 比值介于长城站土壤-湖泊沉积物与东南极湖泊沉积物之间, 源区跨大洋岛弧、大陆岛弧和大陆边缘环境^[37-39]。从 La_N/Yb_N-δEu、La_N/Yb_N-Sm/Nd 图解(图 5b, 图 5c)来看, DC-11 岩芯全新世沉积物与 ACC 南部环流区沉积物(南设德兰群岛-南斯科舍海脊)相似, 它们的 Eu 正异常明显, La_N/Yb_N 比值小, Sm/Nd 比值大, 说明沉积物多来源于地壳相对年轻、中-新生代岩浆活动较强的南设德兰群岛-南极半岛地区^[29, 38]。DC-11 岩芯 ACR 沉积物与威德尔海西北部环流区沉积物相似, 其 Eu 正异常弱, Sm/Nd 比值小, La_N/Yb_N 比值接近于 1, 说明沉积物多来源于地壳相对较老、中-新生代火山岩分布较少的地区, 如南奥克尼、东南极等变质岩区^[29-39]; 与前人在该地区的矿物学示踪研究结果相一致^[40]。这些地区沉积物经冰川刨蚀、搬运入海以后, 可通过顺时针方向运动的冰山或威德尔海环流搬

运至研究区并沉积下来^[40]。DC-11 岩芯末次冰期至冰消期早期沉积介于全新世沉积与 ACR 沉积之间, 其 La_N/Yb_N 比值为 0.75 左右, δEu 值为 1.3 左右, Sm/Nd 比值为 0.2 左右, 并与南美黄土^[32]、现代风尘^[41]投影区部分重叠, 说明它们具有多源混合的特点, 既有来自威德尔海-东南极、南极半岛-南设德兰群岛的物质, 也不排除来自南美大陆的物质, 这与前人研究结果相一致^[6]。DC-11 岩芯取样位置大致位于南设德兰群岛-南斯科舍海脊与南极半岛向北延长线的交点上。以南极半岛延伸线为界, 西侧是 ACC 南部锋面(分支)区, 南侧是威德尔海环流区, 向北为 ACC 主流区^[3, 16]。由于德雷克海峡 ACC 十分强劲, 来自南美洲南部海岸的物质仅局限在斯科舍海北部, 很少能越过 ACC 主轴进入到斯科舍海南部^[6, 42-43], 推测 DC-11 岩芯中南美源物质以风尘为主。大量研究表明, 末次冰期至冰消期早期, 来自南美巴塔哥尼亚的风尘物质远高于现代, 它们通过大气(西风)搬运至南大洋和南极地区, 在这些地区留下一致的记录, 包括南大西洋的 Fe 记录^[44]、斯科舍海的磁化率记录^[9-11]、南极冰芯的 nssCa²⁺与 Fe 通量记录等^[45-46]。

由图 3 可见, 大致以 ACR 为界, DC-11 岩芯 REE 与 Al₂O₃ 含量相关性可分为两段: 全新世-ACR 沉积物相对富 REE, REE 与 Al₂O₃ 含量高度正相关($y = 15.222x - 29.237$, $R^2 = 0.97$); 末次冰期至冰消期早期沉积物相对富 Al₂O₃, REE 与 Al₂O₃ 含量的正相关性相对较弱($y = 9.550x + 7.077$, $R^2 = 0.87$)。Al 是主要造岩元素之一, 海洋沉积物中 Al 的含量变化与沉积物粒度紧密相关, 随沉积物粒度的变细和黏土矿物的增加而增加^[47]; 稀土元素是典型的亲石性元素, 其富集与陆源碎屑含量、来源及海水中自生组分、黏土组分等吸附有关^[29]。从海水中沉积物颗粒反映的角度来看, 海洋沉积过程似乎更有利于 REE 的富集; 从海洋生源组分加入的角度来看, 它们对 REE 和 Al₂O₃ 的稀释效应是相同的, 正如 DC-11 岩芯全新世-ACR 段沉积物一样, BSiO₂ 对 REE 和 Al₂O₃ 的稀释并不影响两者的高度正相关。据此推断, 造成 DC-11 岩芯上、下段沉积物 REE 与 Al₂O₃ 分异的原因可能与 ACR 前后沉积物搬运方式的改变有关。研究表明, 南极周边海洋沉积物以冰海沉积物为主, 围绕南极呈环带状分布^[48]; 冰海沉积物以冰筏碎屑为主, 粗细混杂, 分选差^[40, 49]。除此之外, 风尘沉积在冰期和冰消期不可忽视。风尘经过风的动力分选, 将细粒物质(黏土和细粉砂)卷入大气并搬运至遥远的大洋和南极地区^[43, 10], 其信号在陆源碎屑本底极低的冰芯或开阔大洋沉积物中十分明显,

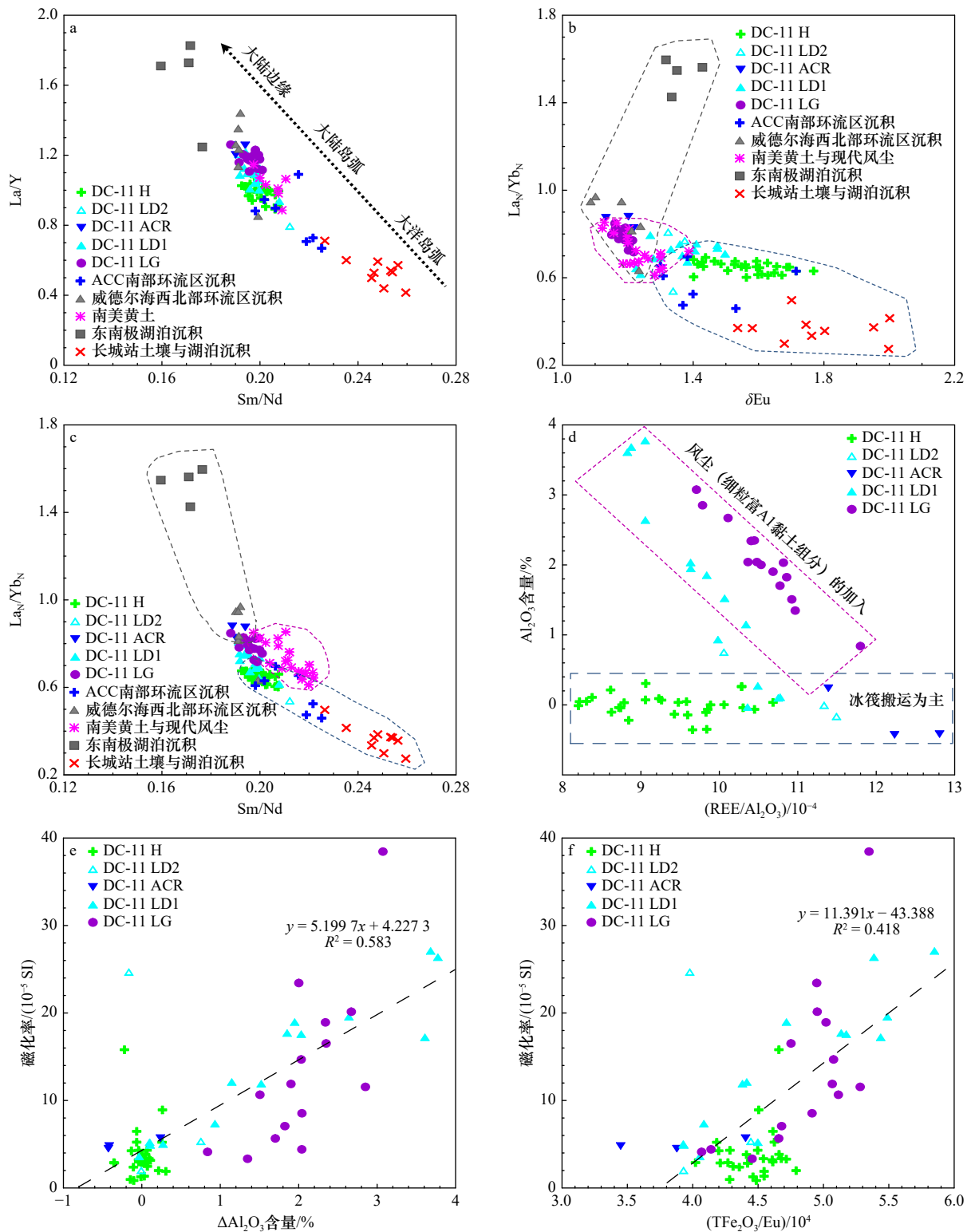


图 5 DC-11 岩芯物源的地球化学判别

Fig. 5 Geochemical discrimination for sediment provenances in Core DC-11

DC-11(H, LD2, ACR, LD1, LG)数据来源于本文; ACC 南部环流区沉积物数据来源于文献 [29]; 威德尔海西北部环流区沉积物数据来源于文献 [29]; 南美黄土数据来源于文献 [32]; 南美现代风尘数据来源于文献 [41]; 东南极湖泊沉积物数据来源于文献 [31]; 长城站土壤与湖泊沉积物数据来源于文献 [29]

DC-11 (H, LD2, ACR, LD1, LG) data is by this study; data of the sediments along the southern branch of ACC are from reference [29]; data of the sediments along the circulation in the northwestern Weddell Sea are from reference [29]; data of loess in South America are from reference [32]; data of modern dust in South America are from reference [41]; data of lake sediments in East Antarctica are from reference [31]; data of soil and lake sediments near Great Wall Station are from reference [29]

但一旦与南极周边海域冰海沉积物混合, 其粒度等信息则可能被掩盖。从矿物地球化学的角度来看, Al_2O_3 偏向于在化学风化产物——黏土矿物中富集, REE 偏向于在独居石、褐帘石、榍石等重矿物中富集^[50], 两者的差别可能使得细粒风尘物质相对富 Al_2O_3 , 如南美黄土的 Al_2O_3 含量可达 22%^[51], REE 含量^[32] 却低于 DC-11 岩芯末次冰期沉积物(表 1)。以 DC-11 岩芯全新世-ACR 段沉积物 REE- Al_2O_3 的线性关系为基础, 计算得到南极冰海沉积物的 Al_2O_3 背景值(括号内项), 进而求出风尘组分加入所导致的 Al_2O_3 增量:

$$\Delta\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Al}_2\text{O}_3_{\text{样品}} - (0.0635 \times \text{REE}_{\text{样品}} + 2.0431) \quad (4)$$

如图 5d 所示, DC-11 岩芯末次冰期至冰消期早期沉积物 $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 高, 且随着 REE/ Al_2O_3 比值的变小而增大, 说明沉积物中加入了一部分细粒富 Al、贫 REE 的风尘组分。ACR 以来沉积物 $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 值低, 不随 REE/ Al_2O_3 比值变化而变化, 说明沉积物在搬运过程中没有明显的富黏土和分选趋势, 搬运方式以冰筏为主, 或受冰山和海流的双重影响。高磁化率是南大洋风尘的特征标志之一^[6, 10]。如图 5e 所示, DC-11 岩芯 $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 与磁化率呈显著正相关($y = 5.1997x + 4.2273$, $R^2 = 0.583$), 这一方面说明 $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 值是可信的风尘指标, 同时暗示风尘中富含细小的磁性矿物, 可能类似黏土, 以微米至亚微米级为主; 尽管 Kim 等^[52] 和 Shin 等^[14] 的研究表明南斯科舍海和北鲍威尔海盆沉积物中磁化率随砂和粗粉砂粒级的含量增加而增加, 不排除部分磁性矿物来源于冰筏碎屑, 部分来源于风尘组分。磁性矿物多含铁^[53], 风尘也富铁^[45], 一个有趣的发现是: 以 Eu 为标准扣除该地区火山物质对铁的影响, $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{Eu}$ 比值同样突出末次冰期至冰消期早期铁的异常富集(图 6)。如图 5f 所示, 岩芯 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{Eu}$ 比值与磁化率呈正相关($y = 11.391x - 43.388$, $R^2 = 0.418$), 说明风的侵蚀-搬运促进了细粒铁磁性矿物在风尘中的富集, Fe/Eu 比值和 $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 值一样对该地区风尘有明确的指示意义。

4.4 末次冰期以来研究区沉积物来源及其气候响应

从 DC-11 岩芯沉积物稀土元素及其与磁化率、 $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 值、 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{Eu}$ 比值的综合分析判别来看, 34 ka BP 以来斯科舍海东南部沉积物主要来自西、南、北三面, 涉及冰山、海流、大气等多种搬运方式。

末次冰期(34~19.6 ka BP) 南极气温低(图 6a), 环南极冰盖-冰架-海冰发育, 冰盖接地线向北迁移至陆架边缘, 南极半岛北部地区包括南设德兰群岛、布兰斯菲尔德海峡南北两侧等为冰盖所覆盖^[54-55]; DC-11 岩芯位处终年海冰或密集海冰区, 海洋

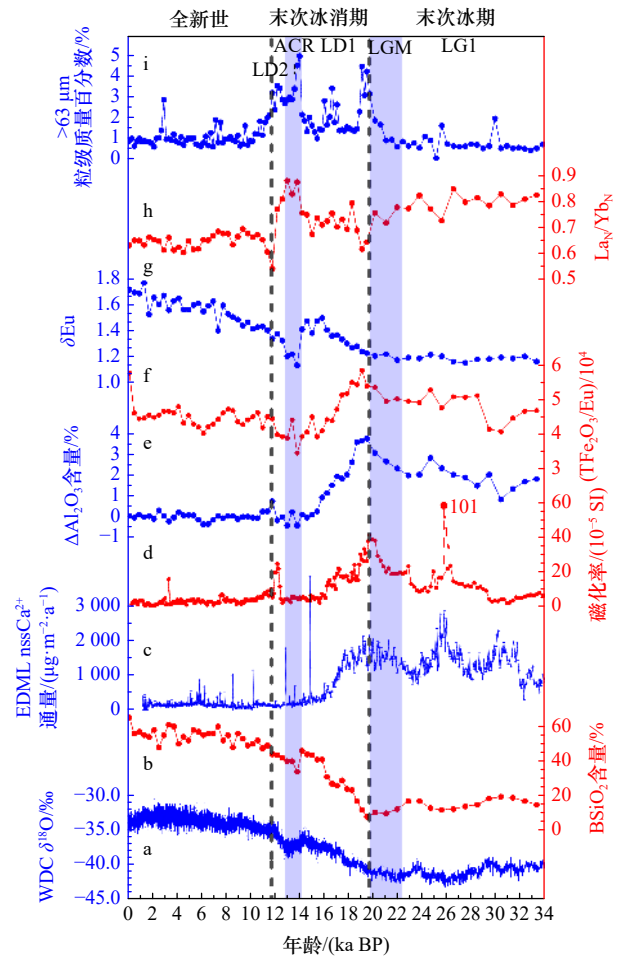


图 6 DC-11 岩芯记录与南极冰芯记录的综合对比
Fig. 6 Comparison of paleo-records from Core DC-11 and Antarctic ice cores

a. 西南极冰芯 WDC $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[25]; b. DC-11 岩芯 BSiO_2 含量; c. 东南极冰芯 EDML nssCa^{2+} 通量^[46]; d. DC-11 岩芯磁化率; e. DC-11 岩芯 $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 值; f. DC-11 岩芯 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{Eu}$ 比值; g. DC-11 岩芯 δEu ; h. DC-11 岩芯 La_N/Yb_N 比值; i. DC-11 岩芯大于 $63 \mu\text{m}$ 粒级质量百分数
a. $\delta^{18}\text{O}$ from West Antarctica ice core WDC^[25]; b. BSiO_2 contents in Core DC-11; c. nssCa^{2+} flux from East Antarctica ice core EDML^[46]; d. susceptibility of Core DC-11 (hereafter); e. $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$; f. $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{Eu}$ ratios; g. δEu ; h. La_N/Yb_N ratios; i. mass percentage of $>63 \mu\text{m}$ grain size

生产率低, 埋藏的生源硅含量也低(图 6b)^[23]。该时期海洋锋面偏北, ACC 南部分支很少越过南设德兰群岛-南斯科舍海脊进入南极半岛北部海域, 不利于该地区冰山和沉积物的向东搬运, DC-11 岩芯沉积物与威德尔海西北部表层沉积物相似, REE 含量高(图 2b), Eu 正异常弱(图 6g), La_N/Yb_N 比值较大(图 6h), 主要来自威德尔海环流和冰山的搬运^[6]。从大于 $63 \mu\text{m}$ 冰筏碎屑含量来看, 该时期沉积物粗组分含量不高, 出现频率也不大(图 6i), 推测该时期南极地区冰盖-冰架处于一种相对稳定的状态, 冰盖底部的沉积物多在

冰盖接地线附近已卸载,从冰架前缘裂解下来的冰山含沉积物少,粒度也较细,类似于现代南威德尔海沉积组合^[40, 56]。该时期南半球西风带靠北,南美巴塔哥尼亚地区风尘发育,大量的风尘通过大气搬运至南大洋和南极地区^[57]。风尘的加入在一定程度上使 DC-11 岩芯沉积物变细,黏土和细粒磁性矿物增加,因而岩芯的磁化率、 $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{Eu}$ 比值大(图 6d 至图 6f),与南极冰芯风尘记录相一致(图 6c)^[46]。

西南极地区末次冰消期大致始于 20 ka BP^[25]。冰消期早期(19.6~14.1 ka BP)气候快速回暖(图 6a),环南极海冰消退,DC-11 岩芯位置从终年海冰或密集海冰区变为季节性海冰区,海洋生产力增大,沉积物中生源硅含量增加(图 6b)^[23]。与此同时,西风带南移,风尘源区的变化使南大洋与南极地区接受的风尘大为减少^[58],DC-11 岩芯磁化率、 $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{Eu}$ 比值等风尘指标迅速下降,至 15 ka BP 前后已接近全新世水平(图 6d 至图 6f)。随着海面上升和海洋锋面的南移^[59, 22],温暖的绕极深层水上涌至南极特别是南极半岛东北部陆架,使该地区冰架快速解体,冰流加快,冰盖后退,冰山携带大量沉积物入海,DC-11 岩芯 19.6~18.5 ka BP 的冰筏碎屑峰在时间上与南极半岛冰盖的开始后退相对应^[60],17~15.5 ka BP 的冰筏碎屑峰与布兰斯菲尔德海峡地区的冰盖退缩相对应^[61](图 6i)。另一方面,随着 ACC 南部绕极深层水越过南设德兰群岛和南斯科舍海脊进入南极半岛北部海域,该地区表层流系大体与 ACC 平行,从而促使该地区冰山和沉积物向东搬运至研究区,拉低了威德尔海冰山和环流对沉积物的贡献,导致 DC-11 岩芯 Eu 正异常值增大(图 6g)。

进入 ACR(14.1~12.9 ka BP),南极气温明显下降(图 6a),南大洋总体变冷^[11];海冰向北扩张,导致生产力下降,DC-11 岩芯生源硅含量小幅降低(图 6b)^[11, 23];同时,海洋锋面小幅北移,导致南设德兰群岛-南极半岛海域 ACC 分量变小,加之冰架-海冰增生,致使表层流减弱,不利于该地区冰山和沉积物向东搬运,所以岩芯中来自威德尔海的物质重新占主导,其 Eu 正异常弱(图 6g), La_N/Yb_N 比值接近于 1(图 6h), Sm/Nd 比值小,与现代威德尔海西北部表层沉积物特征基本一致(图 5)。该时期岩芯大于 63 μm 冰筏碎屑含量极高(图 6i),与 Weber 等^[22]的结果相似,可能与南极地区大规模的冰筏碎屑事件及冰融水排放有关,但也不排除随着南极气温的下降,局部冰盖扩张,导致冰缘区沉积物再侵蚀,并随冰山入海。ACR 冰川扩张在南美中等-高纬度地区十分普遍^[62],但在南极地区鲜

有报道,仅见于阿蒙森海的盖茨冰架^[63]。

冰消期晚期(12.9~11.7 ka BP),南极气温再次回升,海冰减弱,生产力提高,岩芯生源硅含量升高(图 6b)^[23]。与此同时,海洋锋面南移,南设德兰群岛-南极半岛海域 ACC 分量增强,有利于该地区冰山和沉积物的向东搬运,DC-11 岩芯沉积物的 La_N/Yb_N 比值迅速降低(图 6h),Eu 正异常增大(图 6g);温暖的绕极深层水上涌,使南极半岛两侧冰架解体,冰盖退缩,大量冰山入海^[22],岩芯沉积物中含有较多的冰筏碎屑(图 6i)。

进入全新世(11.7~0 ka BP),南极气候趋于平稳,大体与现在相当(图 6a),研究区生产力缓慢上升(图 6b)^[23]。向南侵入的绕极深层水越过南设德兰群岛进入南极半岛海域^[17],使得该地区 ACC 分量增强,促使该地区沉积物向东搬运,导致 DC-11 岩芯沉积物 Eu 正异常明显(图 6g), La_N/Yb_N 比值小(图 6h), Sm/Nd 比值大,地球化学属性介于长城站周边土壤-湖泊沉积物与威德尔海西北部沉积物之间(图 5),说明该时期 ACC 南部环流对 DC-11 沉积物的贡献大体与威德尔海环流相当。从大于 63 μm 组分来看,全新世早期冰山较多,10 ka BP 以来总体较少,对沉积物搬运的贡献相对较弱(图 6i)。

5 结论

(1) 南极斯科舍海东南部海域 DC-11 岩芯沉积物 REE 含量分布与 Al_2O_3 含量相似,与 BSiO_2 含量变化相反,主要赋存于陆源碎屑之中,明显受 BSiO_2 稀释。

(2) 岩芯沉积物与周边海洋、陆地沉积物稀土元素页岩标准化模式、特征参数及比值等对比揭示 DC-11 岩芯沉积物主要有 3 种来源:一是来自西面的南设德兰群岛-南极半岛地区,沉积物 Eu 正异常明显, La_N/Yb_N 比值小,其贡献在冰消期或暖期较大,随着 ACC 南边界的南移,该地区 ACC 分量增加,有利于冰山和沉积物向东搬运;二是来自南面的威德尔海,沉积物 REE 含量高,页岩标准化模式平坦, Eu 正异常弱, La_N/Yb_N 比值较大,其贡献在 ACR 期最大,末次冰期次之,在冰消期早期和晚期明显降低,在全新世最小,沉积物的搬运与威德尔海冰山通道和威德尔海环流密不可分;三是来自南美巴塔哥尼亚的风尘,主要局限在末次冰期和冰消期早期;它通过大气搬运,在一定程度上导致沉积物中黏土和某些细粒磁性矿物增加,使得沉积物磁化率高, $\Delta\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{Eu}$ 比值大。

(3) 34 ka BP 以来研究区沉积环境与气候变化具

有阶段性。末次冰期(34~19.6 ka BP), 环南极冰盖-冰架-海冰发育, 沉积物主要来自威德尔海地区; 同时西风带靠北, 南美风尘发育。末次冰消期早期(19.6~14.1 ka BP) 风尘指标迅速减弱, 海洋锋面南移, 南设德兰群岛-南极半岛海域 ACC 分量增强, 对冰山和沉积物搬运的贡献加大。ACR 期间(14.1~12.9 ka BP), 南极气温明显下降, 冰盖局部扩张, 海洋锋面小幅北移, 来自南设德兰群岛-南极半岛沉积物减少, 加之风尘极少, 来自威德尔海的沉积物占主导。冰消期晚期(12.9~11.7 ka BP) 海洋锋面再次南移, 南设德兰群岛-南极半岛海域 ACC 分量增强, 对岩芯沉积物的贡

献加大。全新世气候温暖(11.7~0 ka BP), 海洋锋面缓慢南移, 更多的绕极深层水通过南设德兰群岛进入布兰斯菲尔德海峡, 使得该地区 ACC 分量继续增强, 对 DC-11 岩芯沉积物的贡献加大, 大体与威德尔海环流相当。

致谢: 感谢中国第 34 次南极科学考察队及“向阳红 01”号考察船人员为样品的采集付出的艰辛的劳动。感谢极地沉积物样品库提供样品。感谢自然资源部、国家海洋局极地考察办公室、中国极地研究中心给予项目支持和帮助。

参考文献:

- [1] Pudsey C J, Howe J A. Quaternary history of the Antarctic Circumpolar Current: evidence from the Scotia Sea[J]. *Marine Geology*, 1998, 148(1/2): 83-112.
- [2] Maldonado A, Barnolas A, Bohoyo F, et al. Contourite deposits in the central Scotia Sea: the importance of the Antarctic Circumpolar Current and the Weddell Gyre flows[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 198(1/2): 187-221.
- [3] Maldonado A, Bohoyo F, Galindo-Zaldívar J, et al. Ocean basins near the Scotia-Antarctic plate boundary: influence of tectonics and paleoceanography on the Cenozoic deposits[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2006, 27(2): 83-107.
- [4] Eagles G, Livermore R, Morris P. Small basins in the Scotia Sea: the Eocene Drake Passage gateway[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242(3/4): 343-353.
- [5] 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*, 2014, 7(2): 113-116.
- [6] 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(3/4): 357-387.
- [7] Cofaigh C Ó, Dowdeswell J A, Pudsey C J. Late quaternary iceberg rafting along the Antarctic Peninsula continental rise and in the weddell and scotia seas[J]. *Quaternary Research*, 2001, 56(3): 308-321.
- [8] Pérez L F, Martos Y M, García M, et al. Miocene to present oceanographic variability in the Scotia Sea and Antarctic ice sheets dynamics: insight from revised seismic-stratigraphy following IODP Expedition 382[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 553: 116657.
- [9] Pugh R S, McCave I N, Hillenbrand C D, et al. Circum-Antarctic age modelling of Quaternary marine cores under the Antarctic Circumpolar Current: ice-core dust-magnetic correlation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284(1/2): 113-123.
- [10] Weber M E, Kuhn G, Sprenk D, et al. Dust transport from Patagonia to Antarctica—A new stratigraphic approach from the Scotia Sea and its implications for the last glacial cycle[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 36: 177-188.
- [11] Xiao Wenshen, Esper O, Gersonde R. Last Glacial-Holocene climate variability in the Atlantic sector of the Southern Ocean[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 135: 115-137.
- [12] Xiao Wenshen, Frederichs T, Gersonde R, et al. Constraining the dating of late Quaternary marine sediment records from the Scotia Sea (Southern Ocean)[J]. *Quaternary Geochronology*, 2016, 31: 97-118.
- [13] Weber M E, Bailey I, Hemming S R, et al. Antiphased dust deposition and productivity in the Antarctic Zone over 1.5 million years[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2044.
- [14] Shin J Y, Kim S, Zhao Xiang, et al. Particle-size dependent magnetic properties of Scotia Sea sediments since the Last Glacial Maximum: glacial ice-sheet discharge controlling magnetic proxies[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 557: 109906.
- [15] Pérez L F, Lodolo E, Maldonado A, et al. Tectonic development, sedimentation and paleoceanography of the Scan Basin (southern Scotia Sea, Antarctica)[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 123: 344-358.
- [16] Orsi A H, Johnson G C, Bullister J L. Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water[J]. *Progress in Oceanography*, 1999, 43(1): 55-109.
- [17] Shevenell A E, Ingalls A E, Domack E W, et al. Holocene Southern Ocean surface temperature variability west of the Antarctic Peninsula[J]. *Nature*, 2011, 470(7333): 250-254.
- [18] Palmer M, Gomis D, del Mar Flexas M, et al. Water mass pathways and transports over the South Scotia Ridge west of 50°W[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2012, 59: 8-24.
- [19] Jiang Mingshun, Charette M A, Measures C I, et al. Seasonal cycle of circulation in the Antarctic Peninsula and the off-shelf transport of shelf waters into southern Drake Passage and Scotia Sea[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 90:

- 15–30.
- [20] Holm-Hansen O, Naganobu M, Kawaguchi S, et al. Factors influencing the distribution, biomass, and productivity of phytoplankton in the Scotia Sea and adjoining waters[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, 51(12/13): 1333–1350.
- [21] Korb R E, Whitehouse M J, Ward P, et al. Regional and seasonal differences in microplankton biomass, productivity, and structure across the Scotia Sea: implications for the export of biogenic carbon[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 59–60: 67–77.
- [22] 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.
- [23] 杨春丽, 陈志华, 肖文申, 等. 3.4万年以来南极斯科舍海古生产力演变及其环境制约[J]. *海洋学报*, 2021, 43(3): 116–125.
Yang Chunli, Chen Zhihua, Xiao Wenshen, et al. Paleoproductivity and its environmental constraints in the Scotia Sea, Antarctica since 34 ka BP[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(3): 116–125.
- [24] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1–312.
- [25] WAIS Divide Project Members. Onset of deglacial warming in West Antarctica driven by local orbital forcing[J]. *Nature*, 2013, 500(7463): 440–444.
- [26] Lee J I, Park B K, Jwa Y J, et al. Geochemical characteristics and the provenance of sediments in the Bransfield Strait, West Antarctica[J]. *Marine Geology*, 2005, 219(2/3): 81–98.
- [27] Dubinin A V, Rimskaya-Korsakova M N. Geochemistry of rare earth elements in bottom sediments of the Brazil Basin, Atlantic Ocean[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2011, 46(1): 1–16.
- [28] Elderfield H, Hawkesworth C J, Greaves M J, et al. Rare earth element geochemistry of oceanic ferromanganese nodules and associated sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(4): 513–528.
- [29] 陈志华, 黄元辉, 唐正, 等. 南极半岛东北部海域表层沉积物稀土元素特征及物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(3): 145–155.
Chen Zhihua, Huang Yuanhui, Tang Zheng, et al. Rare earth elements in the offshore surface sediments of the northeastern Antarctic Peninsula and their implications for provenance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(3): 145–155.
- [30] Freslon N, Bayon G, Toucanne S, et al. Rare earth elements and neodymium isotopes in sedimentary organic matter[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 140: 177–198.
- [31] Levitan M A, Girin Y P, Luksha V L, et al. Modern sedimentation system of Lake Untersee, East Antarctica[J]. *Geochemistry International*, 2011, 49(5): 459–481.
- [32] Gallet S, Jahn B, Van Vliet Lanoë B, et al. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 156(3/4): 157–172.
- [33] Piper D Z. Rare earth elements in ferromanganese nodules and other marine phases[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1974, 38(7): 1007–1022.
- [34] 孟妍, 伏美燕. 去除有机质前后海底沉积物对稀土元素吸附能力的变化研究[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(4): 20–24.
Meng Yan, Fu Meiyuan. Capacity change of marine sediments with and without organic matter for absorption of rare earth elements[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(4): 20–24.
- [35] Pourret O, Davranche M, Gruau G, et al. New insights into cerium anomalies in organic-rich alkaline waters[J]. *Chemical Geology*, 2008, 251(1/4): 120–127.
- [36] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua, et al. REE Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [37] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181–193.
- [38] 郑光高, 刘晓春, 赵越. 南极半岛中生代构造岩浆演化及与南美巴塔哥尼亚对比[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(6): 1090–1102.
Zheng Guanggao, Liu Xiaochun, Zhao Yue. Mesozoic-Cenozoic tectonomagmatic evolution of the Antarctic peninsula and its correlation with Patagonia of southernmost South America[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(6): 1090–1102.
- [39] 郑光高, 刘晓春, 赵越, 等. 西南极岩浆作用及构造演化[J]. *地质力学学报*, 2021, 27(5): 821–834.
Zheng Guanggao, Liu Xiaochun, Zhao Yue, et al. Magmatism and tectonic evolution of West Antarctica[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021, 27(5): 821–834.
- [40] Diekmann B, Kuhn G. Provenance and dispersal of glacial-marine surface sediments in the Weddell Sea and adjoining areas, Antarctica: ice-rafting versus current transport[J]. *Marine Geology*, 1999, 158(1/4): 209–231.
- [41] Gaiero D M, Depetris P J, Probst J L, et al. The signature of river- and wind-borne materials exported from Patagonia to the southern latitudes: a view from REEs and implications for paleoclimatic interpretations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(3/4): 357–376.
- [42] Walter H J, Hegner E, Diekmann B, et al. Provenance and transport of terrigenous sediment in the South Atlantic Ocean and their relations to glacial and interglacial cycles: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(22): 3813–3827.

- [43] Gaiero D M, Probst J L, Depetris P J, et al. Iron and other transition metals in Patagonian riverborne and windborne materials: geochemical control and transport to the southern South Atlantic Ocean[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(19): 3603–3623.
- [44] Martínez-García A, Rosell-Melé A, Jaccard S L, et al. Southern Ocean dust- climate coupling over the past four million years[J]. *Nature*, 2011, 476(7360): 312–315.
- [45] 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.
- [46] Fischer H, Fundel F, Ruth U, et al. Reconstruction of millennial changes in dust emission, transport and regional sea ice coverage using the deep EPICA ice cores from the Atlantic and Indian Ocean sector of Antarctica[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 260(1/2): 340–354.
- [47] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 130–150.
Zhao Yiyang, Yan Mingcai. *Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1994: 130–150.
- [48] 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.
- [49] Wang Haozhuang, Chen Zhihua, Wang Kunshan, et al. Characteristics of heavy minerals and grain size of surface sediments on the continental shelf of Prydz Bay: implications for sediment provenance[J]. *Antarctic Science*, 2016, 28(2): 103–114.
- [50] Garçon M, Chauvel C, France-Lanord C, et al. Which minerals control the Nd–Hf–Sr–Pb isotopic compositions of river sediments?[J]. *Chemical Geology*, 2014, 364: 42–55.
- [51] Baccolo G, Delmonte B, Albani S, et al. Regionalization of the atmospheric dust cycle on the periphery of the East Antarctic ice sheet since the Last Glacial Maximum[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(9): 3540–3554.
- [52] Kim S, Yoo K C, Lee J I, et al. Relationship between magnetic susceptibility and sediment grain size since the last glacial period in the Southern Ocean off the northern Antarctic Peninsula-Linkages between the cryosphere and atmospheric circulation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 505: 359–370.
- [53] Liu Qingsong, Torrent J, Morrás H, et al. Superparamagnetism of two modern soils from the northeastern Pampean region, Argentina and its paleoclimatic indications[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(2): 695–705.
- [54] Anderson J B, Shipp S S, Lowe A L, et al. The Antarctic Ice Sheet during the Last Glacial Maximum and its subsequent retreat history: a review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1/3): 49–70.
- [55] Cofaigh C Ó, 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.
- [56] Reinardy B T I, Pudsey C J, Hillenbrand C D, et al. Contrasting sources for glacial and interglacial shelf sediments used to interpret changing ice flow directions in the Larsen Basin, Northern Antarctic Peninsula[J]. *Marine Geology*, 2009, 266(1/4): 156–171.
- [57] Kohfeld K E, Graham R M, de Boer A M, et al. Southern Hemisphere westerly wind changes during the Last Glacial Maximum: paleodata synthesis[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 68: 76–95.
- [58] Sugden D E, McCulloch R D, Bory A J M, et al. Influence of Patagonian glaciers on Antarctic dust deposition during the last glacial period[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(4): 281–285.
- [59] Toggweiler J R, Russell J. Ocean circulation in a warming climate[J]. *Nature*, 2008, 451(7176): 286–288.
- [60] Heroy D C, Anderson J B. Radiocarbon constraints on Antarctic Peninsula ice sheet retreat following the Last Glacial Maximum (LGM)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(25/28): 3286–3297.
- [61] Graham A G C, Smith J A. Palaeoglaciology of the Alexander Island ice cap, western Antarctic Peninsula, reconstructed from marine geophysical and core data[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 35: 63–81.
- [62] Mendelová M, Hein A S, Rodés A, et al. Glacier expansion in central Patagonia during the Antarctic Cold Reversal followed by retreat and stabilisation during the Younger Dryas[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 227: 106047.
- [63] Lamping N, Müller J, Esper O, et al. Highly branched isoprenoids reveal onset of deglaciation followed by dynamic sea-ice conditions in the western Amundsen Sea, Antarctica[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 228: 106103.

Sediment provenances and environmental changes in the southeastern Scotia Sea, Antarctica, since the Last Glaciation

Feng Zongbao^{1,2}, Chen Zihua^{1,2}, Yang Chunli³, Huang Yuanhui¹, Cui Yingchun⁴,
Tang Zheng^{1,2}, Liu Yanguang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory of Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China; 3. First Exploration Team of Shandong Coalfield Geology Bureau, Qingdao 266500, China; 4. China Polar Research Center, Shanghai 200136, China)

Abstract: Rare earth elements (REE) and their relationships with biogenic silica (BSiO₂), magnetic susceptibility, Al₂O₃ and Fe₂O₃ in Core DC-11 were analyzed to reveal sediment provenances and transport history by iceberg-current-atmosphere since 34 ka BP in the southeastern Scotia Sea, Antarctica. Temporal variation of REE is similar to that of Al₂O₃, indicating they mainly occur in terrigenous detritus and BSiO₂ has obvious dilution effect on them. Sediments with high REE concentration, flat shale-normalized pattern, weak positive Eu anomaly, and high La_N/Yb_N ratio during the last glacial period indicated they are transferred from the Weddell Sea and eroded from the bordering lands with relatively old crust. The increases in magnetic susceptibility, Δ Al₂O₃, TFe₂O₃/Eu ratio indicated an enhanced input of dust from South America during this period. In early Deglaciation (19.6–14.1 ka BP), increasing Eu positive anomaly and lower La_N/Yb_N ratio indicated the southern branch of Antarctic Circumpolar Current (ACC) strengthened and contributed more sediments from the South Shetland Islands and Antarctic Peninsula due to the southward shifts of oceanic fronts, while decreasing magnetic susceptibility, Δ Al₂O₃, TFe₂O₃/Eu ratios showed rapid decrease in dust supply from South America. During the Antarctic Cold Reversal period (ACR, 14.1–12.9 ka BP), sediments from the South Shetland Islands and Antarctic Peninsula decreased sharply due to cold condition and weakened ACC branch, the weakest Eu positive anomaly and highest La_N/Yb_N ratio indicated that the sediments from the Weddell Sea dominated in the core again, and the peak of ice raft debris indicated ice rafting is vital or dominant agent. In the late Deglaciation (12.9–11.7 ka BP), the return of ACC branch to the South Shetland Islands and Antarctic Peninsula contributed more to the sediments in Core DC-11; in Holocene (11.7–0 ka BP), the ACC branch in the area between the South Shetland Islands and Antarctic Peninsula was generally enhanced, and its contribution to core sediments increased to be roughly equivalent to the amount of sediments from the Weddell Sea.

Key words: Antarctic; Scotia Sea; rare earth elements; sediment provenances; environmental changes