



## 晚更新世以来南极罗斯海陆坡沉积物岩芯常量元素地球化学特征及其古环境意义

李国刚, 李云海, 布如源, 季有俊, 李蕙新, 赵 晓, 李 超, 段琳娜

### Geochemical characteristics and paleoenvironmental implications of major elements in sediments from the continental slope of the Ross Sea, Antarctica since late Pleistocene

LI Guogang, LI Yunhai, BU Ruyuan, JI Youjun, LI Yixin, ZHAO Xiao, LI Chao, and DUAN Linna

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022040201>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 东海陆坡—冲绳海槽水体剖面地球化学特征与指示意义

Geochemistry of the water profiles at the slope of East China Sea and Okinawa Trough and its implications

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 102

#### 江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

#### 渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

#### 生物载体对海底冷泉—热液极端环境的地球化学记录

Geochemical records of biological carriers on deepsea hydrothermal vent and methane seep fields

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 42

#### 华南下扬子区早寒武世幕府山组沉积环境：来自于全岩地球化学的启示

Sedimentary environment of the Lower Cambrian Mufushan Formation in the Lower Yangtze region: Evidence from whole-rock geochemistry

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 82

#### 南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李国刚, 李云海, 布如源, 等. 晚更新世以来南极罗斯海陆坡沉积物岩芯常量元素地球化学特征及其古环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 1-11.

LI Guogang, LI Yunhai, BU Ruyuan, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironmental implications of major elements in sediments from the continental slope of the Ross Sea, Antarctica since late Pleistocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 1-11.

# 晚更新世以来南极罗斯海陆坡沉积物岩芯常量元素地球化学特征及其古环境意义

李国刚<sup>1</sup>, 李云海<sup>2</sup>, 布如源<sup>1</sup>, 季有俊<sup>3</sup>, 李蕙新<sup>1</sup>, 赵晓<sup>1</sup>, 李超<sup>1</sup>, 段琳娜<sup>1</sup>

1. 自然资源部北海局北海海洋工程勘察研究院, 青岛 266061

2. 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005

3. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

**摘要:** 基于中国第 32 次南极科学考察在罗斯海外陆坡扇区获取的 ANT32-RA05C 岩芯, 开展常量元素地球化学研究, 探讨地球化学特征及其古环境意义。结果表明, ANT32-RA05C 岩芯以分选差的混合冰海沉积物为主, 含有大量的冰筏碎屑 (平均 29.76%), 并含有一定量生物硅 (平均 4.81%)。化学元素定量测试表明, 沉积物常量元素配分模式为  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{CaO} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO}$ , 其中含量最高的常量元素为 Si, 主要来源于陆源碎屑 (石英) 和硅质生物沉积 (生物硅)。对比 XRF 元素连续扫描与定量测试结果发现, Si、Ca 等相关性较高, 可用作高分辨率环境研究。结合环境指标研究发现, 晚更新世 MIS 7 末期以来, 常量元素含量变化与南极气候具有良好的对应关系, 主要反映了气候对物源和环境的控制, 气候转暖通常对应于冰山和初级生产力输入增强, 气候转冷对应于冰山和初级生产力输入受限。该岩芯对重建罗斯海古气候演变, 深化对罗斯海古环境认识有重要意义。

**关键词:** 地球化学; 环境演变; 冰筏碎屑; 生物硅; 南极罗斯海

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022040201

## Geochemical characteristics and paleoenvironmental implications of major elements in sediments from the continental slope of the Ross Sea, Antarctica since late Pleistocene

LI Guogang<sup>1</sup>, LI Yunhai<sup>2</sup>, BU Ruyuan<sup>1</sup>, JI Youjun<sup>3</sup>, LI Yixin<sup>1</sup>, ZHAO Xiao<sup>1</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, DUAN Linna<sup>1</sup>

1. Beihai Offshore Engineering Survey Institute, North China Sea Administration, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

2. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China

3. Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

**Abstract:** Based on the ANT32-RA05C sediment core obtained from the Ross Sea continental slope sector during the 32nd Chinese National Antarctic Research Expedition, major-element geochemistry, the geochemical characteristics, and their paleoenvironmental implications were analyzed. Results show that the ANT32-RA05C core is dominated by poorly-sorted compound glacial-marine sediment, containing a large amount of ice-rafted debris (average 29.76%) and a certain amount of biogenic silica (average 4.81%). Quantitative analysis of elements shows that the distribution pattern of major elements in core follows  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{CaO} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO}$ . Clearly, the most abundant major element is Si, coming mainly from terrigenous debris (quartz) and siliceous biogenic deposit (biogenic silica). Data of Si and Ca XRF element scanning show good correlation with quantitative analysis results thus could be used for high-resolution environmental research. Combining with environmental indicators, we found that the changes in element content have a good relationship with the Antarctic climate since the end of MIS 7 of late Pleistocene, reflecting mainly the control of climate on provenance and environment. A warming climate usually causes enhanced iceberg inputs and primary productivity, and vice versa in a cooling climate. This study provides a valuable information to reconstruct the paleoclimate and understand the climate evolution of the Ross Sea in the Antarctic region.

**Key words:** geochemistry; environmental evolution; ice-rafted debris; biogenic silica; Ross Sea in Antarctica

资助项目: 南极重点海域对气候变化的响应和影响项目 (IRASCC2020-2022-01-03-02, IRASCC 2020-2022-01-02-03); 极地考察业务化与科研项目 (2021-Z002)

作者简介: 李国刚 (1982—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋沉积研究, E-mail: 121012564@qq.com

通讯作者: 李云海 (1980—), 男, 研究员, 主要从事海洋沉积环境研究, E-mail: liyunhai@tio.org.cn

收稿日期: 2022-04-02; 改回日期: 2022-04-22. 周立君编辑

南极作为地球表面的两大冷源之一,是全球气候变化的重要驱动器和响应器,其特殊的地理位置、环境和气候决定其在全球气候变化和地球系统科学研究中具有不可替代的重要地位。罗斯海作为南极第二大海湾,其南部邻近地球最大的冰架——罗斯冰架,由于冰架进退对气候响应敏感<sup>[4]</sup>,近年来罗斯海周边成为全球气候变化及海洋环境演化等研究的热点区域,各国学者开展了包括地貌学、冰川学以及古海洋学等多学科研究,在重建该地区晚第四纪古海洋、冰川(冰盖/海冰)和气候演变历史等方面取得了一些成果<sup>[5-9]</sup>。

海洋沉积物是记录气候变化信息的有效载体,化学元素作为组成沉积物的基本成分,是恢复和重建古环境变化的重要代用指标之一<sup>[10-12]</sup>,近年来在罗斯海古气候研究中得到了广泛的应用<sup>[13-15]</sup>。Monien等利用元素定量和XRF扫描数据,对采集于罗斯海麦克默多湾的AND-1B岩芯进行研究,区分了沿岸不同的火成岩物源,并识别了晚中新世以来的气候变化信息<sup>[13]</sup>。Damiani等对罗斯冰架下岩芯开展了沉积物和重矿物化学元素分析,认为沉积物化学组成反映了矿物来源的变化,可用于冰盖和冰流演变重建<sup>[14]</sup>。Pistolato等对采集于罗斯海陆坡的3个岩芯开展了包括地球化学在内的多指标研究,揭示了该区晚第四纪以来的冰期/间冰期演变历

史和驱动因素<sup>[15]</sup>。

随着中国第5个南极考察站在罗斯海沿岸选址建设,中国对罗斯海调查也日趋深入,采集了一批高质量的海洋沉积物样品,在古气候、古环境研究中取得了一批成果<sup>[16-19]</sup>。中国第32次南极考察在罗斯海陆坡获取了ANT32-RA05C岩芯, Li等利用古地磁、<sup>230</sup>Th等手段对该岩芯进行了地层年代学研究,并利用多指标进行环境演变验证<sup>[19]</sup>。本文在上述基础上,重点通过化学元素定量测试和高分辨率XRF岩芯元素连续扫描等手段,分析岩芯常量元素地球化学特征,探究其控制因素,结合岩性组成等指标,探讨化学元素对罗斯海陆坡扇区古气候演化的响应,该研究对重建南极罗斯海晚更新世气候演化,深化该区古环境认识有重要意义。

## 1 研究区概况

罗斯海是南太平洋深入南极洲的边缘海,位于158°W~170°E,西靠维多利亚地,东临玛丽伯德地,南界为罗斯冰架(图1)。罗斯海陆架地形起伏,浅滩、海槽相间分布,为冰流蚀刻冲刷造就的典型冰川地貌<sup>[6,20]</sup>。罗斯海陆架平均水深530 m,向外水深迅速增大过渡到陆坡,直至进入水深约3000 m的边缘海盆<sup>[21]</sup>。

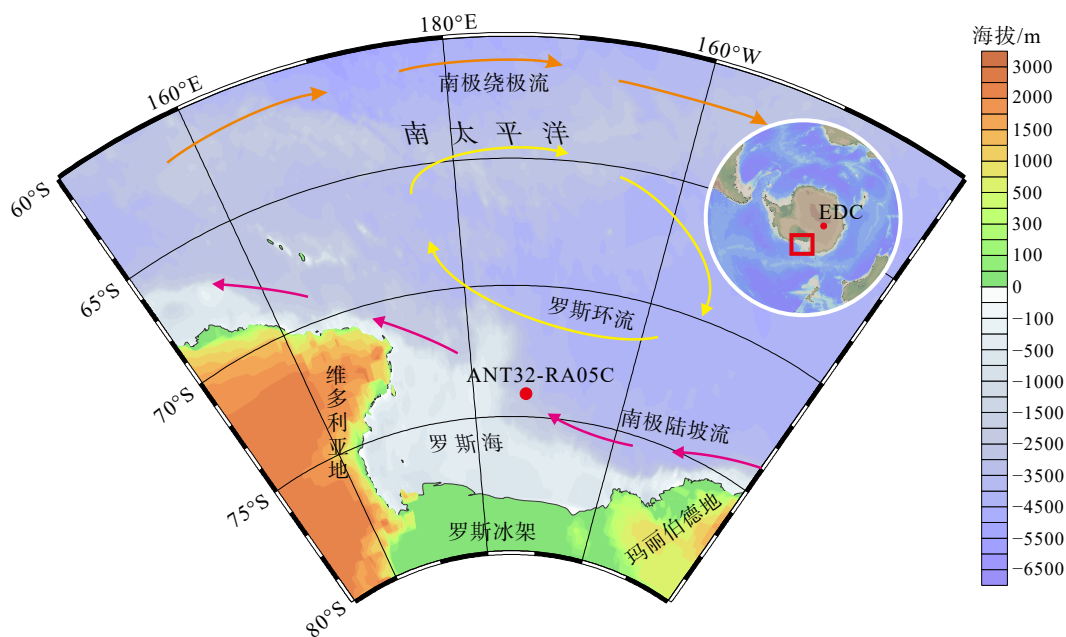


图1 罗斯海研究区概况图

海洋环流引自参考文献 [25-26], EDC: EPICA Dome C 冰芯见文献 [28]。

Fig.1 The study area in the Ross Sea

Circulation system is from references [25-26]; EDC, EPICA Dome C ice core is from reference [28].

作为南极地区浮冰较少、最容易接近的边缘海之一,罗斯海曾是早期南极大陆探险的起点,其海冰为季节性海冰。冬季(3—11月),罗斯海陆架基本冰封,海冰扩展到近60°S的外边缘海;暖季(12月至次年2月)海冰融化,西岸维多利亚地和东岸的玛丽伯德地基岩裸露。基岩类型包括不同时期的花岗岩、变质岩以及火山碎屑岩等<sup>[22-24]</sup>。

罗斯海78°S以南为罗斯冰架,主要由东南极冰盖和西南极冰盖供给<sup>[1]</sup>。晚更新世以来,罗斯冰架曾发生多次进退,末次冰盛期冰架接地线扩张到陆架边缘附近<sup>[7,9]</sup>。罗斯海外海表层环流主要由受西风驱动的南极绕极流、受极地东风驱动的南极陆坡流和夹于两者之间的顺时针罗斯环流组成<sup>[25-26]</sup>。罗斯冰架消融过程中会出现冰山的崩塌脱离,冰山和大冰块在洋流和表层风场驱动下向陆架和开阔洋区卸载大量冰筏碎屑<sup>[27]</sup>。

## 2 材料和方法

中国第32次南极科学考察在罗斯海中陆坡扇区采集到沉积物岩芯ANT32-RA05C,取样位置176°00'51"W、74°57'25"S,水深1878 m(图1),样品长度为280 cm。室内将岩芯剖开,在自然资源部第一海洋研究所利用COX Itrax岩芯扫描仪对岩芯进行XRF元素扫描。扫描步长5 mm,扫描时间30 s,获得Al-U元素扫描强度。随后,按照2 cm的间距对岩芯分样,后续进行化学元素定量组成、冰筏碎屑、激光粒度和生物硅含量等测试。

化学元素定量测试中,元素Si测定采用重量法,测试方法参考GB/T 14506.3-2010,其余常量元素采用美国赛默飞iCAP6300全谱直读等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测试:样品烘干后,研磨至200目以下,经硝酸和氢氟酸高温消解,蒸干后加入铟内标,稀释定容后上机测试。采用标准物质GSD-9对测试实施质量控制,回收率95%~105%,重复测试相对标准偏差<5%。本测试在自然资源部第一海洋研究所海洋地质与成矿作用重点实验室完成。化学元素定量分析间距为4 cm,获得数据70组。

冰筏碎屑含量测定采用筛分法:将10~15 g已知重量的干样充分浸泡,分别过63、250 μm标准筛,称重后计算各粒级百分含量,由于岩芯钙质生物含量极低,可忽略钙质壳体对粗碎屑的影响。激光粒度测试采用Microtrac S3500激光粒度仪:取1 g不含砾石的湿样浸泡,经去除有机质、碳酸盐

后,洗盐、分散,上机测试。以上测试在自然资源部北海局岩土工程实验室完成,测试间距2 cm,获得数据140组。

生物硅含量测定采用碳酸钠提取法:样品经烘干、研磨、去除有机质和碳酸盐、干燥等预处理,加入2 mol/L的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>混合均匀后置于恒温水浴反应,定时提取上层清液,使用UV2802PCS紫外可见分光光度计测试Si含量。该项测试在中国海洋大学岩矿鉴定与沉积物分析实验室完成,分析间距2 cm,获得数据140组。

由于高纬度海区碳酸盐保存较差,岩芯缺少足够的放射性碳测年材料(有孔虫、贝壳等),无法开展<sup>14</sup>C和氧同位素地层学定年,在此采用地磁场相对古强度(relative paleomagnetic intensity, RPI)和<sup>230</sup>Th同位素方法联合确定年代框架,测年方法和结果参照Li等<sup>[19]</sup>。

## 3 结果

### 3.1 岩性组成特征

罗斯海沉积物以泥质混杂沉积为代表的冰海沉积物为主<sup>[9]</sup>,主要由陆源细粉砂和黏土、生源物质、冰筏碎屑3种组分组成<sup>[22]</sup>。为确定ANT32-RA05C岩芯岩性组成,室内分样后开展激光粒度、冰筏碎屑(IRD)和生物硅(BSi)含量测试,结果统计如表1。

由于激光粒度仪测量上限为2 mm,挑选不含砾的细粒部分开展激光粒度测试,结果显示,平均粒径范围4.35~8.20 Φ,平均为6.23 Φ,分选系数为1.33~2.65,平均2.04,分选差。依据福克分类法,沉积物类型以砂质泥为主。

IRD作为反映冰山漂移和冰盖演变、指示气候变化的重要指标,在南北极古海洋学研究中大量运用,通常把粒径>63 μm作为IRD的指示粒级,同时>250 μm也有指示意义<sup>[29-30]</sup>。全样冰筏碎屑结果表明IRD含量较高,其中IRD(>63 μm)平均29.76%,IRD(>250 μm)平均17.75%。另外,岩芯还有一定量生源物质,BSi含量1.32%~6.79%,平均4.81%。根据分样现场观察的岩芯特征,结合测试数据,岩芯ANT32-RA05C岩性可大致分为3层(图2):

(1)0~16 cm:褐色冰海沉积物,本段为整个岩芯冰筏碎屑含量最高、分选最差的层位。IRD(>63 μm)平均含量为40.98%,IRD(>250 μm)平均含量为31.44%,分选系数普遍大于2,BSi含量1.69%。

表1 岩芯粒度参数、冰筏碎屑和生物硅含量  
Table 1 Statistics of grain size parameters, IRD, and BSi contents

	平均粒径/ $\phi$	分选系数	IRD>63 $\mu\text{m}/\%$	IRD 63~250 $\mu\text{m}/\%$	IRD>250 $\mu\text{m}/\%$	BSi/ $\%$
最小值	4.35	1.33	1.15	0.57	0.28	1.32
最大值	8.20	2.65	59.96	25.34	51.49	6.79
平均值	6.23	2.04	29.76	12.01	17.75	4.81
标准偏差	0.33	0.33	9.66	3.80	7.75	1.15

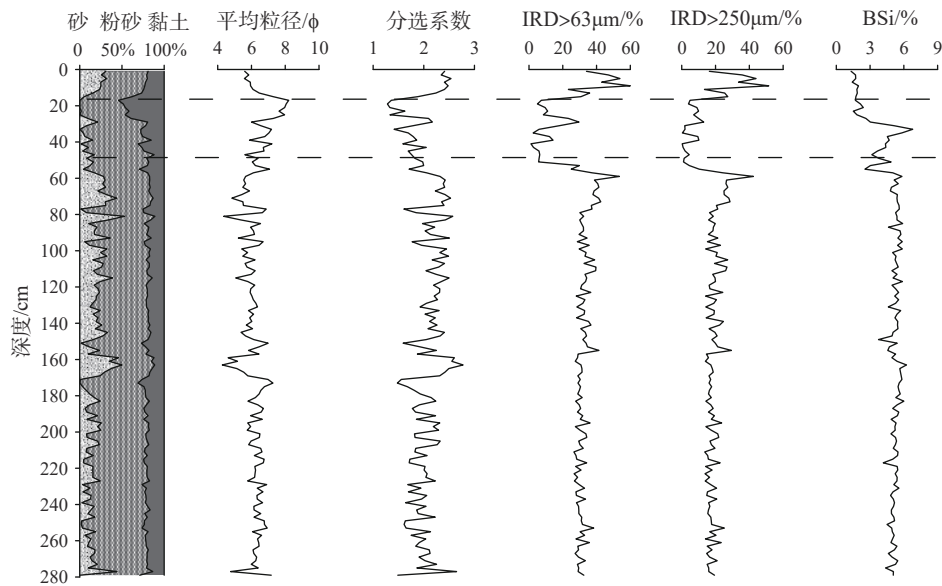


图2 岩芯岩性深度剖面

Fig.2 Distributions of grain size and component of the core

本层常见棱角—次棱角状的大颗粒砾石碎屑，直径最大可达8 cm。

(2) 16~52 cm: 以细粒的黄褐色粉砂和黏土为主，本段沉积物粒度较细，分选较上段明显转好。IRD(>63  $\mu\text{m}$ )含量10.83%，BSi平均含量3.69%。26~32 cm层粒度稍粗，其中28~30 cm层IRD(>63  $\mu\text{m}$ )含量可达29.61%。

(3) 52~280 cm: 岩性变化不大，基本为橄榄灰色冰海沉积物，分选起伏较大，仍为差分选。IRD(>63  $\mu\text{m}$ )平均含量为32.14%，IRD(>250  $\mu\text{m}$ )平均含量为18.82%，本段常见0.5~4 cm不等的砾石。BSi平均含量5.21%。

### 3.2 常量元素定量结果

对70个层位沉积物样品进行化学组成定量测定，将常量元素换算为氧化物，结果见表2。各常量元素中含量最高的为 $\text{SiO}_2$ ，含量为55.65%~69.26%，平均为66.89%， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量次之，为10.21%~15.16%，平均11.21%，其他依次为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} >$

$\text{MgO} > \text{CaO} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO}$ ，其中 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{MnO}$ 含量小于1%。常量元素配分类型不同于上地壳元素丰度。

由元素深度剖面来看(图3)，各常量元素随深度波动起伏，剖面形态大致分为3种类型：第1种以 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 为代表，其在0~12、52~280 cm等粗粒混合冰海沉积物中含量较高，而12~25、32~52 cm细粒层含量较低；第2种以 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 等为代表，分布趋势大致与前者相反，其中 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 等在部分区间表现出不同的含量细节，指示其不同的化学赋存形式；第3种以变价元素Mn为代表， $\text{MnO}$ 在岩芯上部的8~10 cm层含量最高，向上、向下递减。

### 3.3 XRF 元素扫描结果

室内对岩芯剖面进行平整处理，除顶部13 cm含有大块砾石无法开展XRF元素扫描测试外，其余层位按5 mm扫描步长开展测试，获得数据525组。部分常量元素强度的深度剖面见图4，其中Si、Fe、

表 2 岩芯常量元素含量  
Table 2 Statistics of major elements contents in core

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
最小值	55.65	10.21	3.75	2.30	2.30	1.87	0.97	0.48	0.12	0.05
最大值	69.26	15.16	7.41	3.14	3.08	2.97	2.47	0.84	0.21	0.30
平均值	66.89	11.21	4.26	2.58	2.49	2.11	2.09	0.55	0.14	0.07
标准偏差	2.40	0.99	0.62	0.18	0.15	0.20	0.35	0.07	0.02	0.04

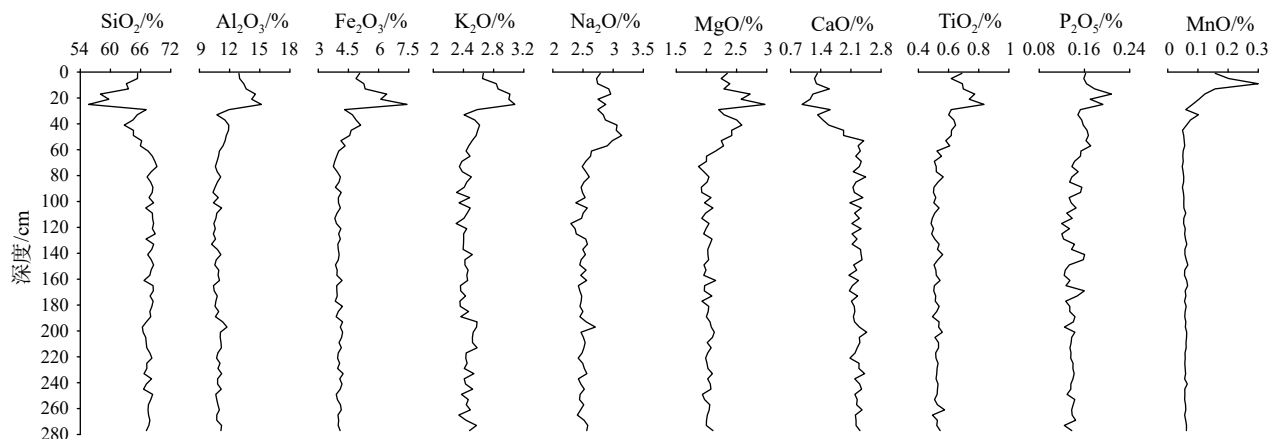


图 3 岩芯常量元素深度剖面

Fig.3 Changes in major element content of the core

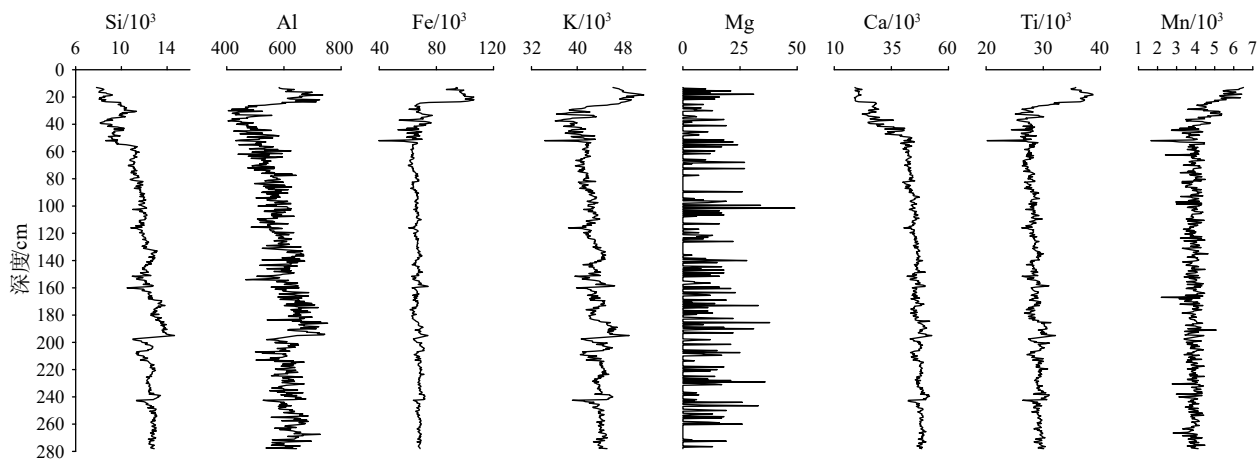


图 4 部分常量元素 XRF 扫描强度深度剖面

Fig.4 Changes in XRF element scanning intensity of major elements with depth

K、Ca、Ti 等扫描强度高, 变化稳定、连续性好, Al、Mn 扫描强度量级较小, 虽然层间低幅波动, 但仍可识别出趋势性, 而 Mg 扫描强度极小, 且不连续。各元素 XRF 扫描强度在岩性特征层位也有明显反映, 如 12~25 cm 细粒层, Si、Ca 扫描强度较小, 而 Al、Fe、Ti、Mn 等扫描强度显著升高。

将 XRF 扫描强度与常量元素定量测试数据进行对比(图 5), 各元素 XRF 扫描强度与元素定量数据显示出不一致的相关性, 其中 Si、Fe、Ca、K、

Ti 两种方法结果呈正相关(相关系数为 0.338~0.861), 且均通过了 0.01 水平的相关性检验, 而 Al 未表现出明显的相关性。XRF 元素扫描具有分辨率高、测试快、成本低等优势, 但沉积物含水量、孔隙度、矿物组成等影响扫描结果的准确性<sup>[31]</sup>。ANT32-RA05C 岩芯沉积物富含粗粒碎屑, 测试表面的粗糙、不均匀等因素导致部分 XRF 元素结果不能很好地与定量测试数据对比, 但 Si、Ca 等元素含量相关性较高 ( $r > 0.6$ ), 可以用作古环境高分辨研究。

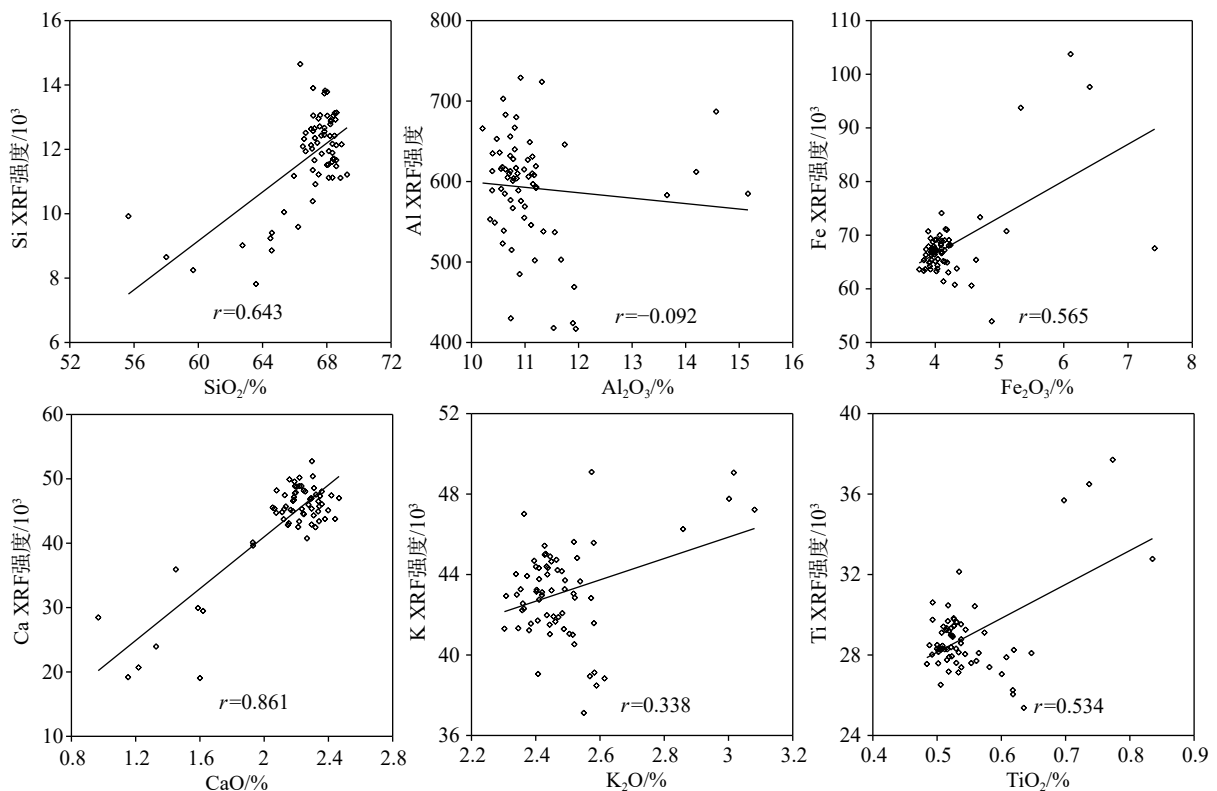


图5 常量元素 XRF 扫描强度与定量测试相关散点图

Fig.5 Relationship between XRF element scanning intensity and quantitative element measurement

## 4 讨论

### 4.1 常量元素的控制因素

沉积物的化学元素反映了岩性成分与矿物组成等信息,同时又受沉积环境影响<sup>[14]</sup>。为讨论化学元素之间的内在联系,探讨元素物源或沉积环境指示意义,对常量元素、BSi和IRD等参数进行相关性分析,结果见图6。

作为含量最高的元素Si,除与Ca、BSi、IRD呈正相关外(图6),与其他元素,如Al、Fe等,均呈负相关。由于Si在化学组成中占主导地位,其含量变化对其他元素起“稀释作用”。沉积物中的Si主要来源于陆源和生物源两部分,前者表现为石英碎屑和硅铝矿物(如长石、黏土矿物等),后者表现为硅藻、海绵骨针等生物沉积形式<sup>[19]</sup>,其中陆源的长英颗粒是绝大多数岩石的组成矿物,具有较强的抗风化能力,可在冰川磨蚀下富集,是IRD的主要成分<sup>[23,32]</sup>。另外,相关性分析也显示,SiO<sub>2</sub>与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>呈高度负相关,说明硅铝矿物比例较低,但考虑到岩芯较高的IRD含量(平均含量达29.76%),认为元素Si主要以石英的形式存在,符合碎屑矿物初步鉴定结果(未

发表的数据)。

BSi为硅藻、海绵骨针硅质生物骨骼残骸中非晶质的二氧化硅,高纬度低温海洋有利于BSi的保存,是古生产力最直观的替代指标<sup>[33]</sup>,而CaO则为钙质生源沉积的指示元素,两者与SiO<sub>2</sub>呈正相关,指示了元素Si也与生源沉积存在联系。岩芯中BSi含量为1.32%~6.79%,体现了元素Si在生源部分的赋存。

Al、Ti在表生作用中比较稳定,是代表陆源碎屑物质的指标<sup>[34-35]</sup>。Al、Ti与Fe、K、Mg、Na等大多数元素呈正相关,表明以上元素主要来自于陆源,广泛在黏土矿物和轻重矿物中存在。Al、Ti等元素又与IRD呈不同程度的负相关,则说明上述元素在小于63 μm的细粒沉积中更为富集,如细粒段12~25 cm富含黏土粒级和Al、Fe、Mg、K等元素,推断以高纬度代表性黏土矿物伊利石、绿泥石为主,这与前人研究结果一致<sup>[36-37]</sup>。

变价元素Mn与其他元素相关性一般,显示出独特的化学特性。Mn常用做指示氧化还原环境<sup>[38]</sup>,还原条件下以可溶解Mn<sup>2+</sup>的形式存在,氧化条件下则呈Mn<sup>4+</sup>沉淀在沉积物中。Mn<sup>2+</sup>在地层中可随氧化条件迁移<sup>[39]</sup>,从垂向剖面来看,富氧海水可穿透至海底8~10 cm,导致MnO<sub>2</sub>在此富集。

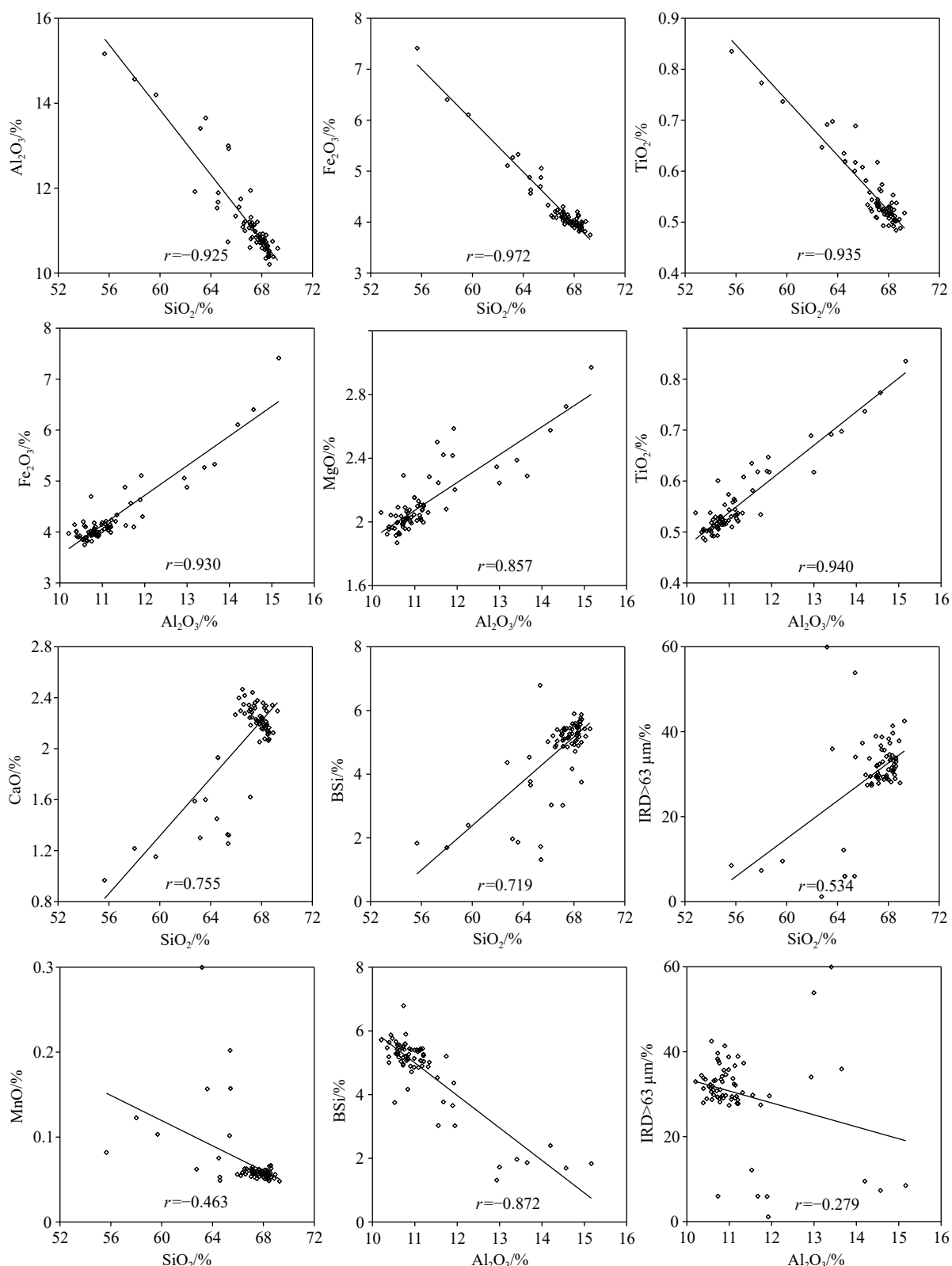


图 6 部分常量元素及 BSi、IRD 相关散点图

Fig.6 Relationship of some major elements with BSi and IRD

#### 4.2 常量元素对环境的指示

依据古地磁、<sup>230</sup>Th 等方法建立年代框架<sup>[19]</sup>, ANT32-RA05C 岩芯底部可识别最早至 MIS 7 末以

来的沉积记录。在此,我们选取元素含量最高的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与不同的环境代用指标进行同年代框架下的比对(图 7),以讨论化学元素的指示意义。环境代用指标分别选取南极气温变化、



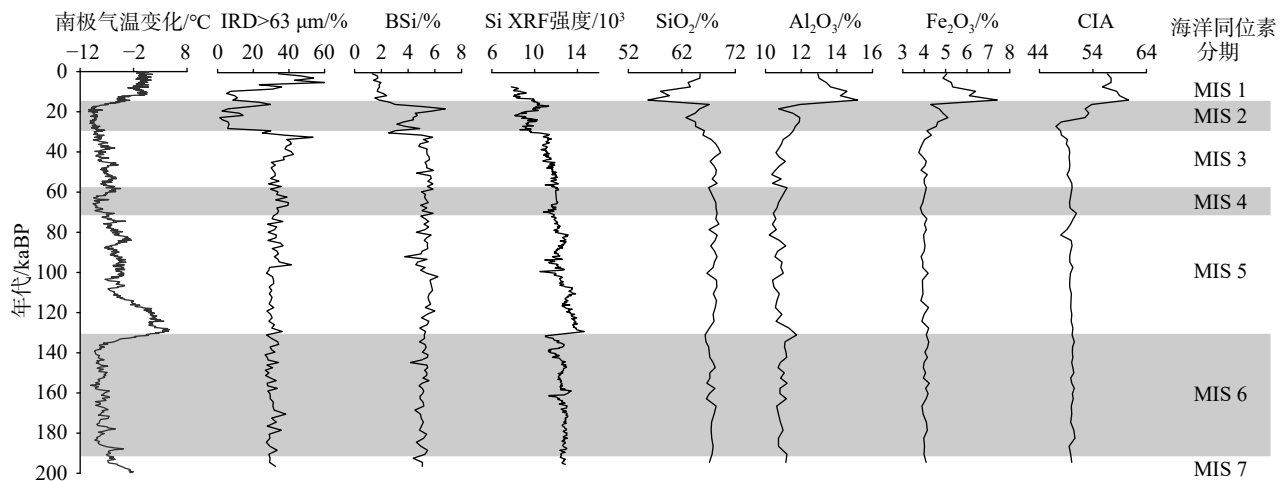


图7 化学元素及环境指标年代剖面对比

Fig.7 Comparison in variations of elements and environmental proxies

IRD、BSi 和化学风化指数(CIA), 其中, 南极气温变化曲线依据东南极 EDC 冰芯高分辨率氧同位素变化推算<sup>[28]</sup>, IRD 指示冰山卸载输入水平<sup>[29]</sup>, BSi 指示海洋初级生产力输入水平<sup>[40-41]</sup>, CIA 指示源区化学风化程度<sup>[42]</sup>。

$$CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100 \quad (1)$$

其中, CaO\*为硅酸盐矿物的摩尔含量。

对混杂沉积组分而言, 无论以石英为主的 IRD, 还是以硅藻为代表的海洋生产力, 其对气候变化均为正响应——间冰期、气候转暖时, 冰川大量崩塌融化, IRD 输入升高<sup>[30]</sup>, 同时升温导致表层水温升高, 季节性海冰范围缩小, 有利于初级生产力的生长, 使生源输入升高<sup>[15,43]</sup>; 相反, 冰期、气候转冷时, 冰川稳定, 冰架、海冰范围扩大, 使 IRD 输入和初级生产力同时受限(图 8)。IRD 和硅质初级生产力对气候变化响应一致, 且均以高 Si 含量为特征, 其在晚更新世以来的气候框架下有较好的体现。

根据 EDC 冰芯研究, 自 MIS 7 末以来南极气温有多次起伏波动<sup>[28]</sup>, 各化学元素及环境指标对此均有反映。具体而言, MIS 6 期间气温波动平缓, 各参数波动起伏。MIS 6/5 界线处, 南极气温显著增高, 分辨率较高的 Si 元素 XRF 扫描强度表现为显著增强。MIS 5–MIS 2 期间, 南极气温波动下降, Si 元素 XRF 扫描强度也显示出一致的变化特征。考虑到 BSi 与 SiO<sub>2</sub> 含量相关性更好, 推测此时 Si 的波动主要反映了初级生产力的变化。MIS 6–MIS 3 期间, Al、Fe 等元素主要赋存于细粒中, 含量大致稳定。CIA 值较小, 指示源区处于低等风化水平, 反映寒冷、干燥的气候环境。

随着气温持续下降, 进入 MIS 2 后, IRD、BSi 输

入显著降低, Si 元素含量(XRF 扫描强度或 SiO<sub>2</sub> 含量)也相应的显著降低。末次冰盛期后, 气温急剧增高, 源区组分化学风化增强, IRD、BSi 输入增强, 对应 Si 元素含量再度升高。Al、Fe 趋势则与之相反, 显示与 Si“此消彼长”的对应关系。

进入全新世初期, 南极升温短暂停止, IRD、BSi 输入降低, Si 元素含量又处于较低的水平, 此时沉积物粒度较细, 以富含 Al、Fe、K 等元素的黏土矿物为主。随着全新世暖期气温的持续升高, 源区化学风化明显增强, 冰筏输入也达到最为强盛的阶段, 期间出现最盛的 IRD 事件。受冰筏颗粒的稀释影响, BSi 在 MIS 1 期间处于低值, 此时 Si 元素主要反映了 IRD 贡献。

## 5 结论

(1) 对采集于罗斯海外陆坡扇区的岩芯 ANT32-RA05C 进行测试研究, 岩性结果表明, 岩芯以混合冰海沉积物为主, 分选差。沉积物含有大量的冰筏碎屑, 其中 IRD(> 63 μm) 平均含量为 29.76%, IRD(> 250 μm) 平均含量为 17.75%, 并有一定量的硅质生物沉积, BSi 平均含量 4.81%。

(2) 岩芯 ANT32-RA05C 化学元素定量测试结果表明, 沉积物各常量元素中含量最高的为 SiO<sub>2</sub>(66.89%), 其次为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(11.21%), 其他依次为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>> Na<sub>2</sub>O> K<sub>2</sub>O> MgO> CaO> TiO<sub>2</sub>> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>> MnO。对比 XRF 元素扫描强度与定量结果发现, Si、Ca 等元素相关性较高, 可用作高分辨率古环境研究。

(3) 相关性分析表明, 元素 Si 主要来源于陆源

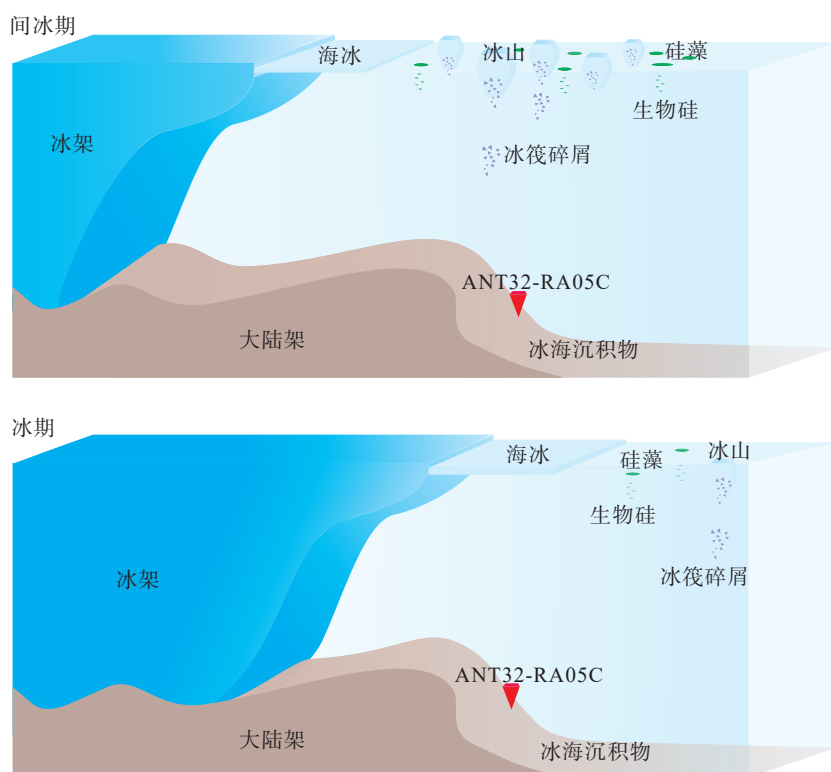


图 8 气候变化与冰山、初级生产力输入关系示意图

间冰期: 气温升高, 冰山崩塌, 冰架和海冰规模减小, 初级生产力繁盛; 冰期: 气温降低, 冰架和海冰规模扩大, 冰架稳定, 初级生产力受限。

Fig.8 Relationship of climate change with icebergs and primary productivity inputs

In interglacial periods, air temperature rises, icebergs collapse and melt, ice shelves and sea ice shrink, and primary productivity flourishes; In glacial periods, air temperature decreases, ice shelves and sea ice expand and remain stable, and primary productivity is restricted.

碎屑(石英)和硅质生物沉积(生物硅), Ca 主要为生物源, Mn 分布受氧化还原条件控制, 其余元素受陆源控制。自 MIS 7 末期以来常量元素含量变化与南极气候具有良好的对应关系, 主要反映了气候对物源和环境的控制——气候转暖通常对应于冰山和初级生产力输入增强, 气候转冷对应于冰山和初级生产力输入受限。

**致谢:** 感谢中国第 32 次南极考察全体队员在海上取样期间的大力帮助, 感谢中国极地研究中心提供的样品。自然资源部第一海洋研究所陈志华研究员、唐正副研究员、朱爱美高级工程师, 中国海洋大学刘明正高级实验师在样品处理、测试方面提供了帮助, 在此深表感谢。

### 参考文献 (References)

- [1] Rignot E, Jacobs S, Mouginot J, et al. Ice-shelf melting around Antarctica [J]. *Science*, 2013, 341 (6143): 266-270.
- [2] Mckay R M, Dunbar G B, Naish T R, et al. Retreat history of the Ross Ice Sheet (Shelf) since the Last Glacial Maximum from deep-basin sediment cores around Ross Island [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 260 (1-2): 245-261.
- [3] Wilson G S, Levy R H, Naish T R, et al. Neogene tectonic and climatic evolution of the Western Ross Sea, Antarctica - Chronology of events from the AND-1B drill hole [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 96-97: 189-203.
- [4] Brachfeld S, Acton G D, Guyodo Y, et al. High-resolution paleomagnetic records from Holocene sediments from the Palmer Deep, Western Antarctic Peninsula [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 181 (3): 429-441.
- [5] Yokoyama Y, Anderson J B, Yamane M, et al. Widespread collapse of the Ross Ice Shelf during the late Holocene [J]. *Proceedings of the National Academy Sciences of the United States of America*, 2016, 113 (9): 2354-2359.
- [6] Anderson J B, Conway H, Bart P J, et al. Ross Sea paleo-ice sheet drainage and deglacial history during and since the LGM [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 100: 31-54.
- [7] Shipp S, Anderson J. Late Pleistocene-Holocene retreat of the west Antarctic ice-sheet system in the Ross Sea: Part 1-Geophysical results [J]. *GSA Bulletin*, 1999, 111 (10): 1486-1516.
- [8] Bart P J, Cone A N. Early stall of West Antarctic Ice Sheet advance on the eastern Ross Sea middle shelf followed by retreat at 27500 <sup>14</sup>C yr BP [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 335-336: 52-60.

- [9] Domack E W, Jacobson E A, Shipp S, et al. Late Pleistocene-Holocene retreat of the West Antarctic Ice-Sheet system in the Ross Sea: Part 2 – Sedimentologic and stratigraphic signature [J]. *GSA Bulletin*, 1999, 111 (10): 1517-1536.
- [10] Pudsey C J. Sedimentation on the continental rise west of the Antarctic Peninsula over the last three glacial cycles [J]. *Marine Geology*, 2000, 167 (3-4): 313-338.
- [11] Young G M, Nesbitt H W. Processes controlling the distribution of Ti and Al in weathering profiles, siliciclastic sediments and sedimentary rocks [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1998, 68 (3): 448-455.
- [12] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data [J]. *Chemical Geology*, 1988, 67 (1-2): 119-139.
- [13] Monien D, Kuhn G, Von Eynatten H, et al. Geochemical provenance analysis of fine-grained sediment revealing Late Miocene to recent Paleo-Environmental changes in the Western Ross Sea, Antarctica [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 96-97: 41-58.
- [14] Damiani D, Giorgetti G. Provenance of glacial-marine sediments under the McMurdo/Ross Ice Shelf (Windless Bight, Antarctica): Heavy minerals and geochemical data [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 260 (1-2): 262-283.
- [15] Pistolato M, Quaia T, Marinoni L, et al. Grain size, mineralogy and geochemistry in late quaternary sediments from the Western Ross Sea outer slope as proxies for climate changes [M]//Fütterer D K, Damaske D, Kleinschmidt G, et al. Antarctica. Berlin: Springer, 2006.
- [16] 赵仁杰, 陈志华, 刘合林, 等. 15ka以来罗斯海陆架岩心沉积学记录及古海洋学意义[J]. *海洋学报*, 2017, 39 (5): 78-88. [ZHAO Renjie, CHEN Zhihua, LIU Helin, et al. Sedimentary record and paleoceanographic implications of the core on the continental shelf off the Ross Sea since 15 ka [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39 (5): 78-88.]
- [17] 崔超, 唐正, REBESCO M, 等. 末次冰消期南大洋深部流通性增强的罗斯海沉积记录[J]. *第四纪研究*, 2021, 41 (3): 678-690. [CUI Chao, TANG Zheng, REBESCO M, et al. Sedimentary records of enhanced deep ventilation during the last deglaciation in the Ross Sea, Southern Ocean [J]. *Quaternary Sciences*, 41 (3): 678-690.]
- [18] 李永斌, 王汝建, 武力, 等. 南极罗斯海扇区晚更新世以来冰筏碎屑记录反映的冰川动力学史[J]. *第四纪研究*, 2021, 41 (3): 662-677. [LI Yongbin, WANG Rujian, WU Li, et al. Glacial dynamics evolutions revealed by ice-rafted detritus record from the Ross Sea Sector of the Southern Ocean since Late Pleistocene [J]. *Quaternary Sciences*, 41 (3): 662-677.]
- [19] Li G, Bu R, Yi L, et al. Geochronology and paleoenvironmental changes of Late Pleistocene sediments in the Ross Sea, Antarctica [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 863336.
- [20] Mosola A B, Anderson J B. Expansion and rapid retreat of the West Antarctic Ice Sheet in Eastern Ross Sea: Possible consequence of over-extended ice streams? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25 (17-18): 2177-2196.
- [21] Smith W O Jr, Sedwick P N, Arrigo K R, et al. The Ross Sea in a sea of change [J]. *Oceanography*, 2012, 25 (3): 90-103.
- [22] Anderson J B, Brake C F, Myers N C. Sedimentation on the Ross Sea Continental Shelf, Antarctica [J]. *Marine Geology*, 1984, 57 (1-4): 295-333.
- [23] Cook C P, Hemming S R, Van De Flierdt T, et al. Glacial erosion of East Antarctica in the Pliocene: A comparative study of multiple marine sediment provenance tracers [J]. *Chemical Geology*, 2017, 466: 199-218.
- [24] Siddoway C S. Tectonics of the West Antarctic Rift System: New light on the history and dynamics of distributed intracontinental extension [R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2007: 91-114.
- [25] Carter L, McCave I N, Williams M J M. Chapter 4 circulation and water masses of the Southern Ocean: A review [J]. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 2008, 8: 85-114.
- [26] Dotto T S, Garabato A N, Bacon S, et al. Variability of the Ross Gyre, Southern Ocean: Drivers and responses revealed by satellite altimetry [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45 (12): 6195-6204.
- [27] Stewart R A, Mayberry S W, Pickerill M J. Composition of till in the vicinity of the Lake Ellen Kimberlite and implications for the source of diamonds in glacial sediments of eastern Wisconsin [J]. *Prospecting in Areas of Glaciated Terrain*, 1988, 8 (1): 103-120.
- [28] 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.
- [29] 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): 777-787.
- [30] 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*, 2010, 55 (4): 432-440. [WANG Rujian, XIAO Wenshen, LI Wenbao, et al. Late Quaternary ice-rafted detritus events in the Chukchi Basin, western Arctic Ocean [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (4): 432-440.]
- [31] Röhl U, Abrams L J. High-resolution, downhole, and nondestructive core measurements from Sites 999 and 1001 in the Caribbean Sea: application to the Late Paleocene Thermal Maximum [J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 2000, 165: 191-203.
- [32] Hobbs W R, Massom R, Stammerjohn S, et al. A review of recent changes in Southern Ocean sea ice, their drivers and forcings [J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 143: 228-250.
- [33] Murray R W, Leinen M. Scavenged excess aluminum and its relationship to bulk titanium in biogenic sediment from the central equatorial Pacific Ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60 (20): 3869-3878.
- [34] 吴旻哲, 乔培军, 邵磊. 西太平洋807A孔的元素地球化学特征及其对中更新世气候转型期的记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30 (2): 67-74. [WU Minzhe, QIAO Peijun, SHAO Lei. Element geochemical record of the Western Pacific Ocean site ODP807A: Implication for the Middle Pleistocene climate transition [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30 (2): 67-74.]
- [35] 徐兆凯, 李安春, 李铁刚, 等. 东菲律宾海表层沉积物常量元素组成及地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30 (6): 43-48. [XU Zhaokai, LI Anchun, LI Tiegang, et al. Major element compositions of surface sediments in the east Philippine Sea and its geological implication [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30 (6): 43-48.]

- [36] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans [J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7): 803-832.
- [37] Griffin J J, Windom H, Goldberg E D. The distribution of clay minerals in the World Ocean [J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1968, 15(4): 433-459.
- [38] Pedersen T F, Price N B. The geochemistry of manganese carbonate in Panama Basin sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(1): 59-68.
- [39] Froelich P N, Klinkhammer G, Bender M L, et al. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(7): 1075-1090.
- [40] Leinen M, Cwienk D, Heath G R, et al. Distribution of biogenic silica and quartz in recent deep-sea sediments [J]. *Geology*, 1986, 14(3): 199-203.
- [41] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(9): 1415-1426.
- [42] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [43] Grobe H, Mackensen A. Late Quaternary climatic cycles as recorded in sediments from the Antarctic continental margin[M]//Kennett J P, Warkne D A. *The Antarctic Paleoenvironment: A Perspective on Global Change*. Washington, D. C. : American Geophysical Union, 1992, 56: 349-376.