



南极菲尔德斯半岛西海岸海滩沉积物环境磁学特征及其控制因素

唐怀能, 王永红, 黄清辉

Environmental magnetic characteristics and influencing factors on the west coast of Fildes Peninsula, Antarctica

TANG Huaineng, WANG Yonghong, and HUANG Qinghui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020092001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南极半岛西侧别林斯高晋海陆缘含水合物系统及资源潜力

Gas hydrate system and resource potential of the continental margin of the Bellingshausen Sea to the west coast of the Antarctic Peninsula

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 136

渤海湾西岸全新世以来沉积物地球化学与黏土矿物特征及其对环境和气候的响应

Geochemical and clay mineral characteristics of the Holocene sediments on the west coast of Bohai Bay and their implications for environmental and climatic changes

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 75

南极罗斯海柱样沉积物中有机碳和氮元素地球化学特征及其来源

Geochemical characteristics and source of organic carbon and nitrogen in the column sediments from the Ross Sea, Antarctica

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 83

苏北废黄河口表层沉积物分布特征及其控制因素

Distribution pattern of surface sediments around the abandoned Yellow River estuary of North Jiangsu Province and its controlling factors

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 118

海底沉积物生物气演化特征及气源影响因素分析

Evolution characteristics of biogas in seabed sediments and their influencing factors on gas sources

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 169

南海典型断面表层沉积物中氧化还原敏感元素的分布特征及其控制因素

Distribution pattern and controlling factors of redox sensitive elements in the surface sediments from four typical transects in the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 90



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020092001

南极菲尔德斯半岛西海岸海滩沉积物环境磁学特征及其控制因素

唐怀能¹, 王永红¹, 黄清辉²

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

2. 同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092

摘要: 南极无冰区独特的环境系统近几十年来被广泛地关注和研究, 同时环境磁学方法在环境变化研究中也越来越多的应用。本文通过对 2015 年采自南极菲尔德斯半岛西海岸一根长 26 cm 的柱样进行环境磁学、粒度、²¹⁰Pb 和稳定碳同位素测试分析发现, 由于海岸基岩为安山质玄武岩, 所以沉积柱样整体的磁性矿物含量较高, 表现出较强的磁性, 其磁化率均值 (χ_{lf}) 高达 $1597 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 约为一般海滩磁化率值的 3~4 倍。其磁性矿物类型主要是假单畴的亚铁磁性矿物颗粒 (磁铁矿) 且含有少量的反铁磁性矿物颗粒 (赤铁矿)。垂向上 ²¹⁰Pb 和粒度结果显示, 柱样上段沉积物粒度较细, 水动力较弱使得细粒磁性矿物颗粒被快速保存下来, 而随着深度的增加粒度逐渐变粗, 岸滩水动力相对增强, 而且底部受到生物有机质溶解作用的影响导致柱样上段磁学参数值高于下段。

关键词: 环境磁学; 海滩沉积物; ²¹⁰Pb 测年; 稳定碳同位素; 菲尔德斯半岛

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Environmental magnetic characteristics and influencing factors on the west coast of Fildes Peninsula, Antarctica

TANG Huaineng¹, WANG Yonghong¹, HUANG Qinghui²

1. Key Laboratory of Submarine Science and Exploration Technology, Ministry of Education, College of Marine and Earth Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Key Laboratory of River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The unique environmental system of the Antarctic ice-free region has been widely studied in recent decades, and environmental magnetism is doubtlessly the method most commonly used in the study. In the year of 2015, a 26 cm long core was collected by the authors from the west coast of the Antarctic peninsula for environmental magnetism, granularity, ²¹⁰Pb and stable carbon isotope testing and analysis. The bedrock of the coast is dominated by andesitic basalt, so the sediments of the core samples are high in magnetic minerals in general, that resulted in high magnetism. The average susceptibility (χ_{lf}) is about $1597 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, almost 3~4 times higher than the beach magnetic susceptibility. The magnetic minerals mainly consist of ferromagnetic particles (magnetite) with small amount of antiferromagnetic particles (hematite). The vertical changes in ²¹⁰Pb and granularity data suggest that the sediment particle size is too fine for water movement, and therefore, the movement of pore water is weak. Under such a circumstance, the fine magnetic mineral grains are easily to be preserved. With the increase in depth, the sediments gradually become coarser, and the movement of water is thus enhanced. Plus the influence of biological organic dissolution, magnetism parameters of the lower part of the core is decreased accordingly.

Key words: environmental magnetism; beach sediment; ²¹⁰Pb dating; stable carbon isotope; Fildes Peninsula

南极地区因其独特的环境系统, 成为研究人类活动对全球变化及生态环境变化响应的天然实验室, 是国际全球变化研究的核心区域之一^[1-2]。菲尔

德斯半岛作为南极最大的无冰区之一, 是世界各国研究南极环境变化的起点和焦点地区, 近几十年国内外学者对菲尔德斯半岛上的湖泊沉积物、海洋沉

资助项目: 国家重点研发计划“基于长序列及多要素原型观测的水沙异变研究”(2016YFC0402602); 国家重点研发计划重点专项二级课题“极地环境优控污染物前沿研究评估”(2019YFC1408201-03)

作者简介: 唐怀能(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积环境方面的研究工作, E-mail: huainengt@163.com

通讯作者: 王永红(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋地质和环境研究, E-mail: yonghongw@ouc.edu.cn

收稿日期: 2020-09-20; **改回日期:** 2021-01-19。周立君编辑

积物、冰水沉积物、冰芯等古环境记录载体进行了大量的研究,如 Sun 等^[3]、Wang 等^[4]通过对企鹅海豹粪土层有机地球化学的分析(图 1 中 Y2 湖、G 湖),恢复了半岛过去生物数量和生态环境变化情况;Lu 等^[5]、Fabri-Jr 等^[6]通过分析半岛表层土壤、陆生植物(地衣、苔藓)中重金属污染指标,以及 Na 等^[7-8]、Li 等^[9]通过分析半岛冰雪、土壤中有机污染物含量指标,指出了由于受人类活动影响半岛冰雪土壤、植被中重金属元素(Pb、Cr、Hg)和有机污染物(PHAs)含量显著增加;此外,谢周清等^[10]通过对半岛西湖沉积物中的部分稀土元素和微量元素的分析重建了该地区近 2 000 年来的气候演变情况(图 1),李小梅等^[11]通过对湖泊沉积物常量元素含量变化的分析恢复了全新世以来半岛的环

境变化情况。综上可知对半岛研究已经比较详细,但研究环境变化需要了解沉积物本身的性质和控制因素。该岛主体为火山岩,主要由玄武岩和玄武质安山岩组成,因而岸滩沉积物不同于一般海滩,因此对于该岛上沉积物本身的性质有待深入的研究。

环境磁学测量具有快速、无损、经济的特点,还可以检测到沉积环境中的微小变化^[12-16],通过研究磁性矿物颗粒的搬运、沉积和转化,可以建立研究对象与沉积环境变化之间的关系。本文以南极菲尔德斯半岛西海岸岸滩沉积物柱样为载体,通过测试沉积物柱样磁学参数,结合粒度分析和²¹⁰Pb 测试数据以及稳定碳同位素值,在分析沉积物磁性特征的基础上,为探究南极地区海滩沉积物特征以及环境变化提供理论基础。

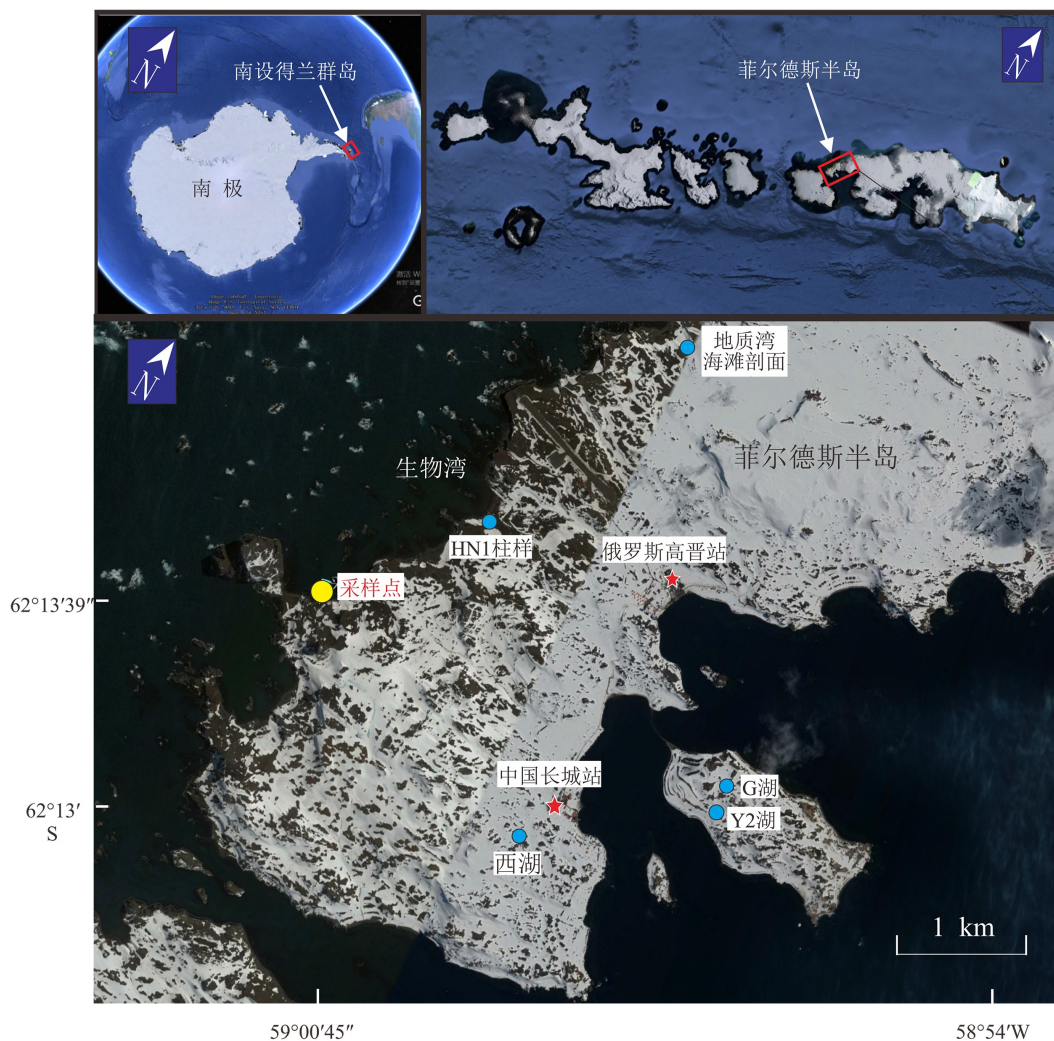


图 1 采样点位置图

图中采样点为本文研究样品点位, Y2 湖、H 湖、地质湾海滩剖面、HN1 柱样、西湖为前人研究点位。

Fig.1 sample location map

The sampling points in the figure are those studied in this paper, and the sampling points of Y2 Lake, H Lake, Dizhiwan beach profile and HN1 column sample are the points of previous researches.

1 研究区域概况

南设得兰群岛位于南极半岛北面约 120 km, 由 11 个大岛和若干小岛组成^[17]。菲尔德斯半岛是群岛最大的无冰区(图 1)^[18], 南北长约 8 km, 东西宽 2.5~4.5 km, 总面积约 38 km²。该地区属于亚南极海洋性气候, 年平均气温约为-2.1 °C^[19]。地表植物以隐花植物地衣、苔藓和藻类为主, 以象海豹为优势种, 多集中在西南海岸区以北海滩(如生物湾)^[1]。菲尔德斯半岛火山岩主要为玄武岩和玄武质安山岩, 安山岩和英安岩所占的比例较小, 且次火山岩的化学成分与熔岩的区别很小。在半岛东海岸一般有 4~6 级海岸堆积阶地, 且均为砾质或砂砾质堆积物, 半岛西海岸多为陡峭的基岩海岸, 仅在较大的海湾内才有明显的砾砂质海相堆积物, 且海拔多在 18 m 以下^[20]。

2 样品和实验方法

沉积柱样是 2015 年 1 月中国第 31 次南极科学考察活动期间用洁净 PVC 管采自南极菲尔德斯半岛西海岸海滩上, 地理坐标为 62°12'39" S、59°00'45" W(图 1)。总长为 26 cm, 现场按 1 cm 间距分割后装入不同的聚乙烯袋中, 再用锡箔密封放入低温环境下避光保存。

磁学测试: 样品前处理, 将样品置于 50 °C 以下低温环境烘干后, 用玛瑙研磨成粉末状, 称取约 5 g 样品用聚乙烯保鲜膜包裹后, 置于 10 cm³ 的塑料样品盒中, 压实固定进行磁性测量。环境磁学实验在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成, 首先使用英国 Bartington MS2 磁化率仪测量低频(0.47 kHz)和低频(4.7 kHz)磁化率(χ_{lf} , χ_{hf}), 其次选用 Dtech2000 交变退磁仪, 将样品置于交变磁场峰值 100 mT、直流磁场 0.04 mT 下处理获得非磁滞剩磁(ARM), 利用捷克 AGICO JR-6A 旋转岩石剩磁测量仪进行测量, 再次进行等温剩磁测量, 将样品在 PPMP10 脉冲磁化仪中经 2 T 磁场磁化获得饱和等温剩磁(SIRM), 然后将具有饱和等温剩磁的样品在强度 300 mT 的反向磁场中获得等温剩磁 IRM_{-300mT}, 各步骤获得的剩磁用 AGICO JR-6A 测定。上述实验完成后, 利用 MMVFTB 选择典型样品进行热磁分析, 测量样品从室温加热至 700 °C 再冷却至室温的磁化强度-温度(M-T)曲线, 测量在空气环境中进行^[21]。由于 ARM 与所加的弱直流场强($H_{DC}=0.04$ mT=

31.84 Am⁻¹)成正比, 不同的 H_{DC} 会造成 ARM 的值无法直接对比, 为消除影响, 将其归一化^[22], 即 $\chi_{ARM}=ARM/H_{DC}$ 。然后根据上述测试结果计算相关磁学参数^[23]:

$$\chi_{fd\%} = [(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}] \times 100 \quad (1)$$

$$S_{-300} = 100 \times (SIRM + IRM_{-300mT}) / (2 \times SIRM) \quad (2)$$

$$HIRM = (SIRM + IRM_{-300mT}) / 2 \quad (3)$$

式中, $\chi_{fd\%}$ —磁化率频率百分比; χ_{lf} —低频磁化率; χ_{hf} —高频磁化率; HIRM—硬剩磁; SIRM—饱和等温剩磁; IRM_{-300mT}—300 mT 反向磁场中获得的等温剩磁。

稳定碳同位素测试: 将样品冷冻干燥 24 h, 称取约 0.5 g 的样品放入离心管中, 然后加 10 mL 的 1 mol·L⁻¹ 的盐酸充分摇匀后静置 48 h 以去除无机碳, 将反应后的样品在 3500 r·min⁻¹ 下离心 10 min, 倒掉上清液, 然后加入超纯水, 重复上述操作 5 遍将酸性样品稀释为中性, 然后再将处理好的样品放在 50 °C 的烘箱中将其烘干, 称取烘干后的样品 8 mg 左右放入锡杯中^[24-25], 在青岛海洋科学与技术国家实验室使用稳定同位素质谱仪(IRMS)进行测试。计算公式为 $\delta^{13}C = [R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1] \times 1000$, 其中 $R_{\text{样品}}$ 为 $^{13}C/^{12}C$ 的相对比率, $R_{\text{标准}}$ 为国际标准物质 PDVB 的碳同位素比值, 实验分析结果的相对误差为 $\pm 0.1\%$ 。

²¹⁰Pb-¹³⁷Cs 测试: 称取 2~5 g 冷冻干燥的沉积物样品装入特定的测试样盒密封 15 天, 然后在中国科学院南京地理与湖泊研究所使用美国 EG&G Ortec 公司生产的由高纯锗井型探测器(Ortec HPGe GWL)与 Ortec919 型谱控制器和 IBM 微机构成的 16 k 道多道分析器所组成的 γ 谱分析系统^[26]进行测试分析。

粒度测试及镜下观察: 在中国海洋大学海洋地球科学学院粒度测试分析实验室将样品充分搅匀后, 采用四分法原理取样品的四分之一, 在低温下烘干后称重。用标准粒度筛(粒度间隔为 1 ϕ)筛分, 然后计算出各个粒度所占的百分含量。挑选全样及 0.063~0.125 mm 粒级的样品在体视显微镜(OLYMPUS-SZ61)下观察。

3 结果

3.1 磁学实验结果

3.1.1 磁性矿物含量

磁化率是沉积物中磁性矿物, 包括亚铁磁性矿

物、反铁磁性矿物、顺磁性矿物、抗磁性矿物磁化率值的总和,亚铁磁性矿物的磁化率值较高,而顺磁性矿物和抗磁性矿物的磁化率值较小或为负值,故样品磁化率一般反映了亚铁磁性矿物含量的多少^[22]。柱状样的 χ_{lf} 为 $(1315\sim 1781)\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $1597\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,柱样中较高的磁化率均值反映了亚铁磁性矿物含量较高。SIRM不受顺磁、抗磁性物质的影响,主要由亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物贡献^[27]。柱样SIRM值为 $(156706\sim 215261)\times 10^{-6}\text{ Am}^2\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $188536\times 10^{-6}\text{ Am}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

根据磁性综合参数,柱样可以划分为3段(图2),其中第I段(1~5 cm), χ_{lf} 和SIRM值变化较小而且相对较高,表示磁性矿物含量较高;第II段(6~16 cm), χ_{lf} 和SIRM值也相对较高但呈锯齿状波动变化,说明磁性矿物含量高但各层位之间存在差异性;第III段(17~26 cm), χ_{lf} 和SIRM值随着深度的增加不断减小,说明磁性矿物含量有一定的减少。

3.1.2 磁性矿物粒径大小

磁性矿物的磁畴结构随晶粒大小而变化,通常分为多畴(MD, $> 10\text{ }\mu\text{m}$)、假单畴(PSD, $0.1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$)、稳定单畴(SSD, $0.03\sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$)和超顺磁(SP, $< 0.03\text{ }\mu\text{m}$)晶粒。沉积物的磁性特征随磁畴结构而改变,因此,通过磁畴可以获取磁性矿物晶粒大小信息^[28]。非磁滞磁化率(χ_{ARM})一般指示样品中稳定单畴(SSD)矿物颗粒的含量^[29-30]。柱样的

χ_{ARM} 为 $(1693\sim 3666)\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $2766\times 10^{-8}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,随着深度的不断增加而逐渐减小。 χ_{ARM}/SIRM 、 χ_{ARM}/χ_{lf} 、 SIRM/χ_{lf} 的值都可以反映样品中磁性矿物颗粒的大小,其中 χ_{ARM}/SIRM 、 χ_{ARM}/χ_{lf} 的值和磁性矿物颗粒的粒径大小呈负相关关系,即其比值越高而磁性矿物颗粒越细。而细的磁性矿物具有较高的 SIRM/χ_{lf} 的值。

从图2中可知 χ_{ARM}/SIRM 、 χ_{ARM}/χ_{lf} 在第I段为高值,且相对稳定,磁性矿物颗粒较细;第II段既有高值又有低值,相对变化较大,既有细颗粒的磁性矿物层又有粗颗粒的矿物层;第III段随着深度的增加其值相对减小,即其磁性矿物颗粒随着深度的增加逐渐变粗。

此外,频率磁化率百分比($\chi_{fd}\%$)是超顺磁矿物颗粒相对含量的指标,柱样的 $\chi_{fd}\%$ 值为 $0.09\%\sim 1.47\%$,说明超顺磁矿物颗粒比例很小。Day^[31]等指出用Mrs/Ms和Hrc/Hc可以确定磁性矿物的粒度。根据磁学参数综合特征在各段共选择4个样品(5、8、20、23 cm),从图3上可以看出所选的几个样品的磁性矿物的粒度都落在了假单畴磁性矿物颗粒区域范围内,说明样品的磁性矿物颗粒基本上为PSD颗粒,或者是SD与MD的混合,但明显以MD颗粒为主。

3.1.3 磁性矿物类型

柱样 S_{300} 的值为 $98.5\%\sim 99.8\%$,平均值为 99.3%

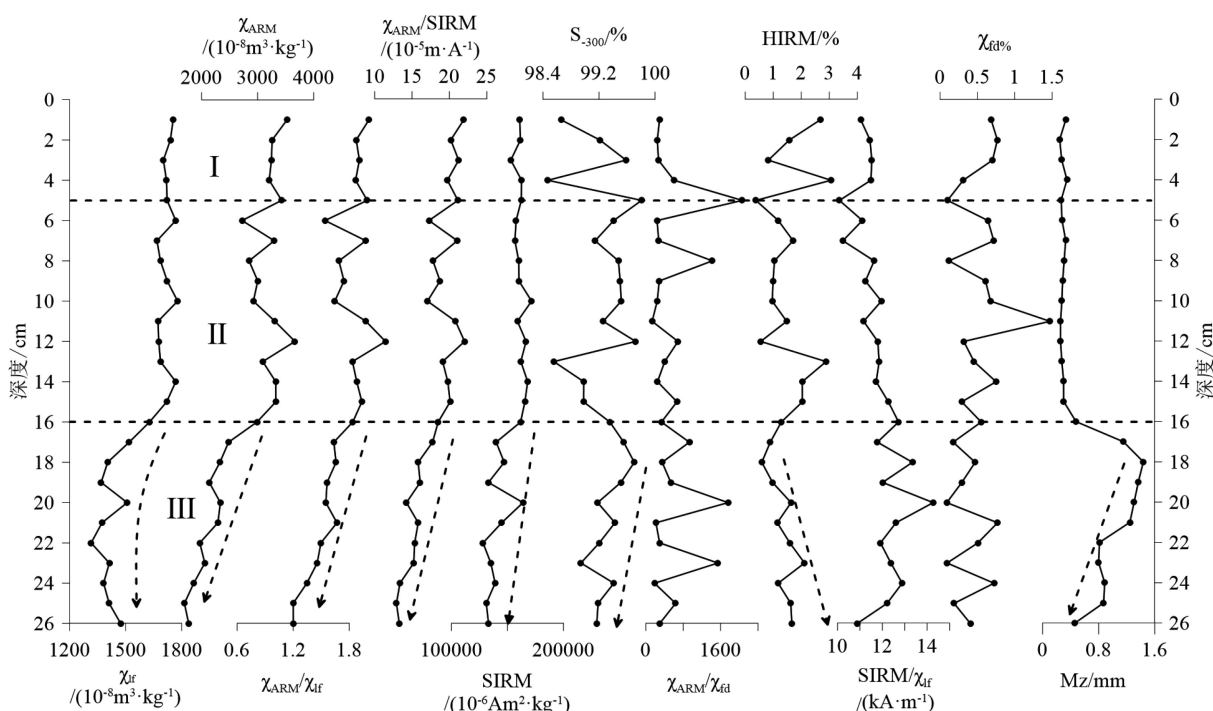


图2 柱状样的磁学参数及其比值随深度变化曲线

Fig.2 Variation of magnetic parameters and their ratios with depth

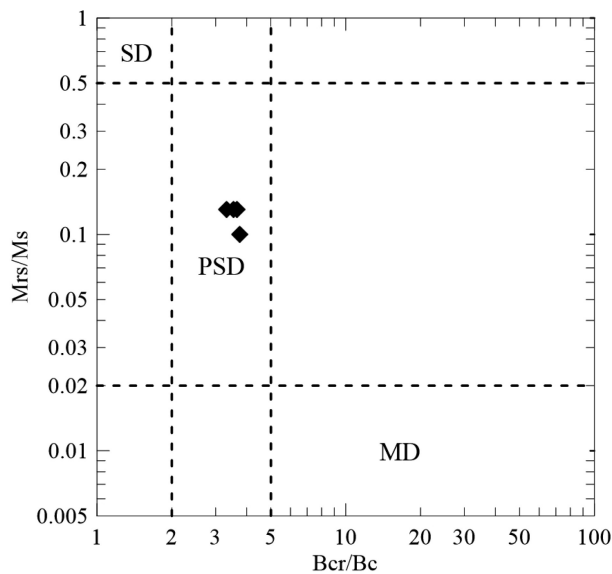


图 3 所选样品的 Day 图^[31-33]
SD—单畴颗粒, PSD—假单畴颗粒, MD—多畴颗粒。
Fig.3 Day diagram of the selected samples
SD-Single domain particles, PSD-Pseudo-single domain particles, MD-Multiple domain particles.

(表 1), 其值非常接近于 1, 由此可知亚铁磁性矿物主导了样品的磁性特征。SIRM/ χ_{lf} 可用于区分磁性矿物类型, 对于低矫顽力的磁性矿物, 磁黄铁矿的 SIRM/ χ_{lf} 值很高, 多为 $100\text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$; 胶黄铁矿和磁赤铁矿的 SIRM/ χ_{lf} 值中等, 主要集中于 $10\sim40\text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$; 而磁铁矿的 SIRM/ χ_{lf} 值通常小于 $20\text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$, 多为

$10\text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[34]。从图 2 中可知, 柱状样从上到下的 SIRM/ χ_{lf} 值基本上都小于 $10\text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$, 范围为 $8\sim10\text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$, 故样品中的亚铁磁性矿物以磁铁矿为主导。

由磁滞回线可以直观地确定饱和磁化强度、饱和磁化外场、饱和剩余磁化强度、矫顽力、剩磁矫顽力等磁性参数, 由这些磁性参数可以确定磁性矿物的种类和粒度^[35]。由图 4 可知样品在 200 mT 时, 其回线就已经闭合了, 而且 5、8、20 cm 样品的矫顽力分别为 7.9、8.8、8.7 mT, 均小于 10 mT, 剩磁矫顽力分别为 29.5、29.4、30.8 mT。而单畴磁铁矿矫顽力和剩磁矫顽力的理论值分别为 10 和 33 mT, 多畴磁铁矿的矫顽力和剩磁矫顽力的理论值分别为 2 和 15 mT, 赤铁矿的矫顽力和剩磁矫顽力的理论值分别为 400 和 700 mT^[36]。由此可见, 沉积物主要磁性矿物的矫顽力和剩磁矫顽力与磁铁矿较吻合, 实验值比单畴磁铁矿的理论值偏低, 主要原因可能与含有粗粒度的假单畴及多畴磁性矿物颗粒有关, 与前面 Day 图所反映出来的样品磁性矿物颗粒的磁畴状态较为一致。居里温度是鉴定磁性矿物类型的方法之一^[37]。从图 4 可以看出, 所有样品的热磁曲线均显示了 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的居里温度, 指示了氧化的磁铁矿的存在。

3.2 稳定碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$)

稳定碳同位素指标已经较为广泛地应用于南

测试参数	第I段		第II段		第III段	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
$\chi_{lf}/(10^{-8}\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$	1702~1754	1727	1627~1781	1709	1315~1518	1418
$\chi_{ARM}/(10^{-8}\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$	3208~3526	3343	2722~3666	3145	1693~2481	2091
SIRM $/(10^{-6}\text{Am}^2\cdot\text{kg}^{-1})$	173813~199122	190423	170772~212543	197464	156705~215261	177939
$\chi_{fd}\%$	0.1~0.8	0.5	0.1~1.4	0.6	0.1~0.8	0.4
χ_{ARM}/χ_{lf}	1.9~2.0	1.9	1.5~2.2	1.8	1.2~1.7	1.5
$\chi_{ARM}/\text{SIRM}/(\text{m}\cdot\text{A}^{-1})$	16.3~19.7	17.6	13.8~19.3	16	9.8~13.9	11.9
HIRM $/(10^{-6}\text{Am}^2\cdot\text{kg}^{-1})$	3337~30204	16697	5456~28867	15009	5569~18502	11838
$S_{-300}/\%$	98.5~99.8	99.1	98.6~99.7	99.2	98.9~99.7	99.3
HIRM/ $\%$	0.4~3.1	1.7	0.6~2.9	1.5	0.6~2.1	1.3
中值粒径/mm	0.2~0.3	0.3	0.3~0.5	0.3	0.5~1.4	1
砾石含量/ $\%$	1.6~8.8	5.2	1.0~17.8	6.2	8.8~43.6	27.6
砂含量/ $\%$	75.3~89.1	82.8	71.3~87.4	81.5	55.2~98.0	74.4
粉砂和黏土含量/ $\%$	9.4~16.0	12.0	9.5~15.6	12.5	1.0~7.1	2.6

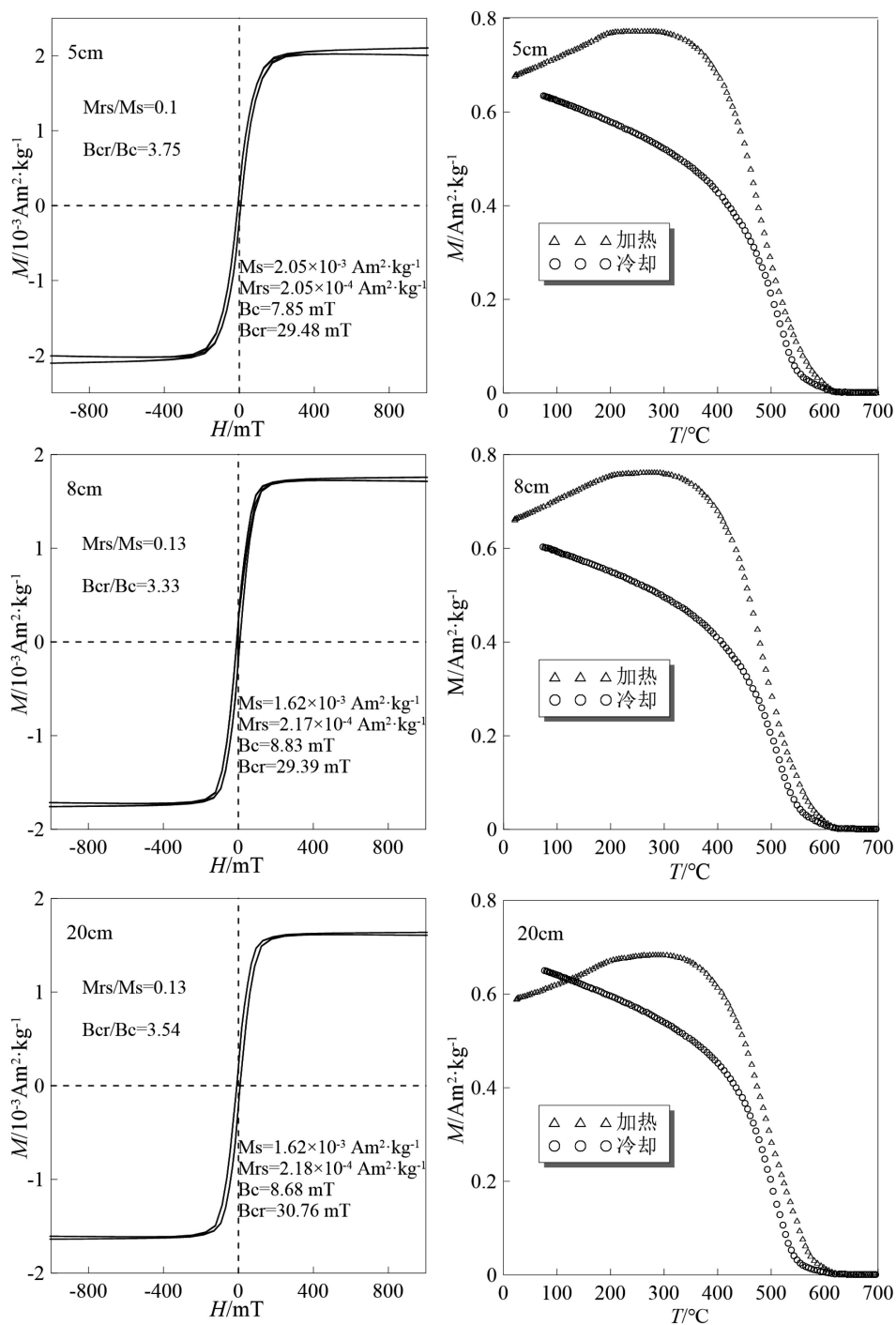


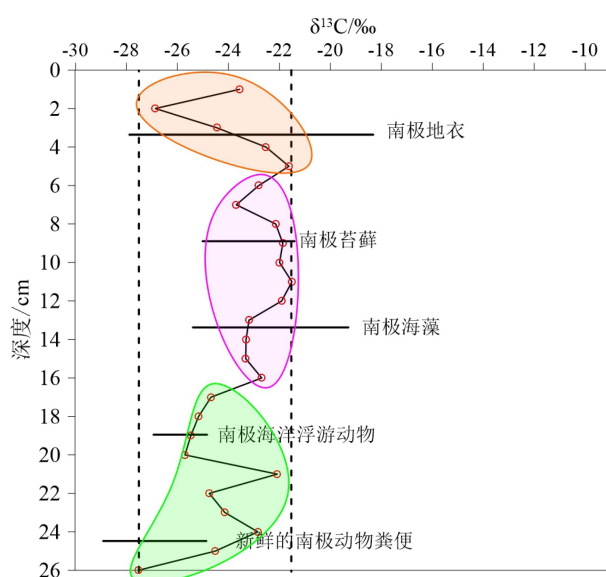
图4 所选样品的磁滞回线（左）和热磁曲线（右）

Fig.4 Hysteresis loops and thermo-magnetic curves of selected samples

极无冰区生态环境变化的研究上。Sun 等^[3]对南极阿德雷岛一湖泊过去 3 000 年企鹅粪土沉积物的元素地球化学特征和碳同位素进行分析发现,碳同位素和生物标型元素一样可以作为企鹅粪土输入的有效指标,这是因为湖泊藻类内源和企鹅外源输入的有机碳等不同碳源具有不同 $\delta^{13}\text{C}$ 值,企鹅输入的有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 低至约 -30‰ ,而藻类有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 仅仅略低于 -10‰ ,基岩风化产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -20‰ 上下

波动。

由图 5 可知,本文柱样第 I 段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-26.8\text{‰} \sim -21.6\text{‰}$,平均值为 -23.8‰ ,其值较接近南极地衣和南极苔藓;第 II 段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-23.6\text{‰} \sim -21.5\text{‰}$,平均值为 -22.5‰ ,其值和基岩风化物、南极海藻等较为接近;第 III 段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-27.5\text{‰} \sim -22.0\text{‰}$,平均值为 -24.69‰ ,其值在三段中最低且和南极海洋浮游动物、新鲜的南极动物粪便相近。

图 5 沉积物柱样 $\delta^{13}\text{C}$ 值

横线表示南极地区不同起源的有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围, 据文献 [38]。

Fig.5 $\delta^{13}\text{C}$ value of sediment column

The horizontal line indicates the range of $\delta^{13}\text{C}$ values of organics of different origins in the Antarctic region, according to reference [38].

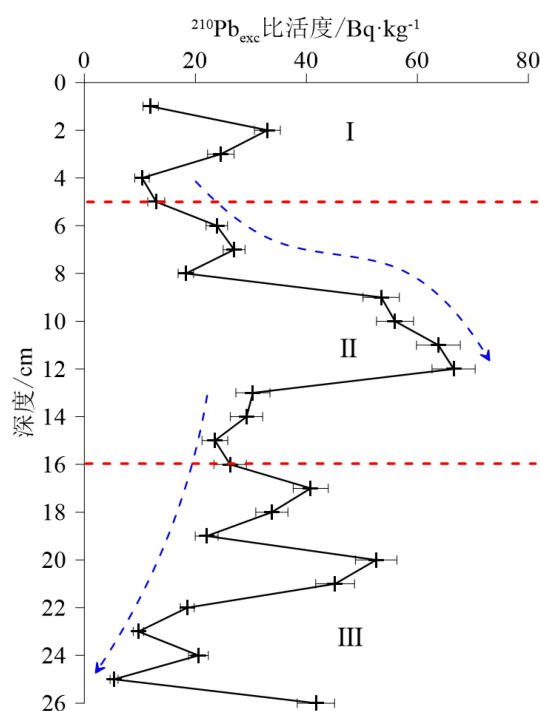
3.3 ^{210}Pb 测试结果

本文由于样品量的原因未检测到 ^{137}Cs 的比活度, 而且 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 未出现理想型的活度衰变模式 (图 6), 所以并不能根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 计年模式 (CIC 模式或 CRS 模式) 来准确计算沉积物的年龄及沉积速率, 只用来判断沉积速率的相对变化情况。结合图 6 可知, 第 I 段 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 活度和深度呈负相关关系, 说明岸滩沉积速率相对稳定; 第 II 段柱样大致表现为在 6~12 cm 段 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 活度较高且与深度呈正相关关系, 说明岸滩沉积速率有所增加, 而 13~16 cm 段 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 活度随着深度的增加而减小, 说明岸滩沉积速率又恢复到相对稳定状态; 对于第 III 段整体呈现摆动型的下降, 表明岸滩沉积环境相对动荡。

3.4 粒度特征及矿物镜下观察

总的来看柱样沉积物主要由砂粒级物质组成, 其含量为 55.2%~98.0%, 平均为 78.9%。由表 1 可知, 第 I、II 段的砂含量相对较高, 平均值分别为 82.8%、81.5%, 而第 III 段的砂含量较上两段小, 其平均值为 74.4% (图 2、7)。

样品的岩性特征表现为: 第 I 段主要为黑灰色细粒玄武质砂, 在 1、2、3 cm 层位分别发现约 2~3 根动物毛发; 第 II 段主要为黑色至浅黄色的细砂, 在其下部含有部分颗粒较大的砾石碎屑; 第

图 6 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ (过剩 ^{210}Pb) 比活度-深度曲线Fig.6 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ (surplus ^{210}Pb) specific activity-depth curve

III 段主要为浅灰色至暗黄色粒径较大的砂砾碎屑, 21 cm 层位挑出 1 根动物毛发、25 cm 层位挑出 11 根动物毛发和 2 块植物碎片、26 cm 层位挑出 15 根动物毛发, 其他层位未见有动物毛发和植物碎片 (图 8)。挑选 3、12、21 cm 层位的全样和筛分后的 0.063~0.125 mm 粒级的沉积物进行镜下观察 (图 7), 从图中可以看出沉积物大多为不透明矿物, 而且磁铁矿所占的比例相对较高。在 3、12 cm 层位中不透明矿物含量不论是全样还是 0.063~0.125 mm 粒级都要高于 21 cm 层位, 其下层 21 cm 磁铁矿所占比例要小于 3、12 cm 层位。

4 讨论

4.1 沉积物磁性矿物来源及强磁性原因

沉积物中磁性矿物可能来源有母岩风化作用产生的碎屑磁性矿物、盆地中原地化学沉淀作用或改造已有矿物、由生物控制或诱导生成的新矿物 [39-40]。一般当 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 的值高于 $200 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$ 时、 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{lf}}$ 大于 40 时、 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{fd}}$ 大于 1000 时指示为菌铁磁性矿物存在 [22]。从上述分析结果来看, 柱样的磁学参数均远小于指示生物成因磁性矿物的阈值, 样品磁性矿物的生物来源可能性不大。菲尔德斯半岛西海岸主要是由安山玄武岩组成, 属于侵

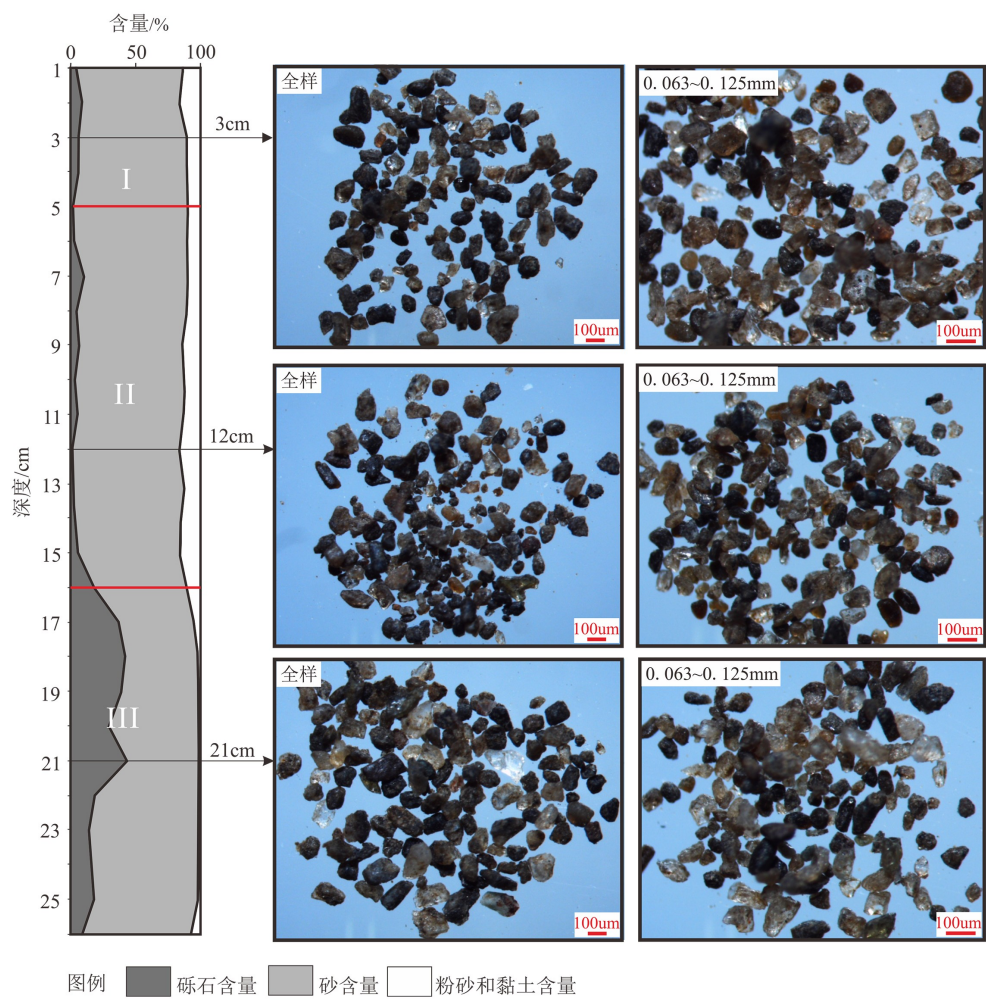


图 7 所选层位矿物组合
Fig.7 Mineral comositions in selected layers



图 8 样品中所含的主要矿物及动植物残体
Fig.8 Main minerals of the sample

蚀性海岸,而且南极半岛及边缘群岛海滩和无冰区出现的大部分碎屑物质是由冻融差异作用引起基岩破碎所致^[41],结合镜下矿物鉴定可知沉积物中的主要矿物为辉石、角闪石、斜长石,并含有许多磁铁矿(图 8),由此可知沉积物中磁性矿物主要来自于海岸周围安山质玄武岩岩屑,其磁性矿物主要是假单畴的磁铁矿且含有少量的赤铁矿。

前人研究表明玄武岩中磁铁矿、钛磁铁矿等的副矿物含量较高^[42],整个柱样的磁学参数较其他岩性类型沉积物偏高的原因与沉积区周围基岩的岩性类型有较高的相关关系。通过将本文和其他不同类型沉积物的磁性参数进行比较发现(表 2),不论是黄河、长江和东海陆架沉积物还是南极摩西岛土壤和湖泊沉积物的磁化率、饱和等温剩磁和非磁滞磁化率均远远小于本文沉积物,但同时也可以看出印度尼西亚东部的玄武岩、安山岩的磁化率值和本文沉积物的值大致相同,甚至略高于本文。

4.2 磁性参数垂向变化特征及控制因素

本文根据磁学参数变化特征将柱样分为 3 段(图 2)。

第 III 段(17~26 cm):该段磁学参数整体比上两段小,且随深度增加不断减小。沉积物磁学参数

一般会受到粒径大小的影响^[48-49]。整个柱样的磁学参数和中值粒径呈现负相关关系(图 2),磁化率和中值粒径负相关系数 R^2 高达 0.71,同时从图 7 中可知该段的中值粒径以及砾石含量明显大于上段沉积物,因此该段沉积物磁学参数的减小一定程度上是由于沉积物粒径增加所致。 χ_{ARM}/χ_{lf} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 等指示磁性矿物粒径大小的参数以及 χ_{lf} 、 $SIRM$ 指示磁性矿物含量多寡的参数随深度增加呈减小的趋势,说明磁性矿物含量不断减少,磁性矿物粒径逐渐变粗。黄婧等^[1]在研究南极菲尔德斯半岛西海岸生物湾海滩阶地上海豹粪土层时,通过分析有机地球化学指标曾指出柱样的底层真菌和微生物的活动要远强于表层,刘健等^[50]曾指出在铁氧化物还原阶段,碎屑成因的亚铁磁性矿物(如磁铁矿)按粒级先小后大的顺序有选择性地被溶解。在镜下发现 21、25、26 cm 含有一定数量的动物皮毛和植物碎片(图 8),其他层位均未发现,而 $\delta^{13}C$ 值可以用来追踪有机质的来源^[38],从图 5 可知该段 $\delta^{13}C$ 值比较接近南极新鲜的动物粪便以及南极地衣、苔藓的值,这都表明该段沉积物尤其是底层沉积物一定程度受到陆源动植物有机质输入的影响。因此该段可能会出现上述溶解反应导致底部细粒磁性矿物含量减少,磁性矿物粒径变粗。该段粒度数据显示

表 2 不同类型沉积物的磁学参数
Table 2 Magnetic parameters of different types of sediments

沉积物	物源类型		χ_{lf} / $10^{-8}m^3\cdot kg^{-1}$	χ_{ARM} / $10^{-8}m^3\cdot kg^{-1}$	SIRM / $10^{-6}Am^2\cdot kg^{-1}$	HIRM / $10^{-6}Am^2\cdot kg^{-2}$	$S_{-300}/\%$	数据来源
黄河	黄土	范围	20~100	23~509	1942~11982	139~956	86.4~99.7	文献[43]
		平均值±标准差	43±13	164±80	5574±1445	372±101	93.3±2.3	
长江	中酸性火成岩	范围	43~220	84~662	5551~16763	241~671	92.4~96.3	文献[43]
		平均值±标准差	73±20	286±130	10900±2505	525±111	95.0±0.7	
南极摩西岛土壤	片岩、砾岩	范围	9~339.6	—	1000~39000	—	81.5~98.5	文献[44]
		平均值±标准差	55.1±75.8	—	6700±6900	—	90±4.2	
东南极Sandy湖	长英质片麻岩	范围	20.96~66.19	60~410	—	—	—	文献[22]
		平均值±标准差	—	—	—	—	—	
印度西部海滩	片岩、花岗岩	范围	1.2~60.3	—	48.7~6908.4	222.9~74989.2	9~82	文献[45]
		平均值±标准差	9.1±19.2	—	940.7±2243	8938.6±24774.2	52.8±22.1	
印度尼西亚东部熔岩	玄武岩、安山岩	范围	734.87~1795.17	—	—	—	—	文献[46]
		平均值±标准差	1471.53	—	—	—	—	
中国东海北部陆架	黄河长江入海物质	范围	15~50	30~130	—	—	0.84~0.88	文献[47]
		平均值±标准差	—	—	—	—	—	
南极菲尔德斯半岛海滩	玄武岩、安山岩	范围	1314.8~1780.8	1692.8~3666.3	156705.7~215260.6	333.7~3020.4	98.5~99.8	本文
		平均值±标准差	1600.9±152.7	2772.4±592.5	188732.4±16370.1	1392.8±685.4	99.3±0.3	

沉积物的中值粒径整体比上两段大,同时 ^{210}Pb 结果显示该段沉积速率相对稳定,随着海岸水动力条件加强,在波浪作用下磁铁矿等重矿物在沉积区附近被反复冲刷磨蚀,使得较粗的磁性矿物被保存下来。

第I段和第II段: χ_{lf} 、SIRM指示磁性矿物含量多寡的参数值较高,说明磁性矿物含量相对较高, χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{lf}}$ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 等指示磁性矿物粒径大小的参数也相对较高,说明柱样磁性矿物粒径较细。由于采样点位于菲尔得斯半岛西侧一级海岸阶地,对沉积环境的水动力条件变化较为敏感,由 ^{210}Pb 结果可知沉积速率相对于下段加快,同时样品的中值粒径较细且变化较小,表明海滩的沉积动力相对稳定,有利于细颗粒的磁性矿物保存。

5 结论

(1)柱样主要是假单畴的亚铁磁性矿物(磁铁矿)且含有少量的反铁磁性矿物(赤铁矿、针铁矿)。由于海滩基岩为玄武岩和玄武质安山岩,柱样表现出较强的磁学特征,其磁化率均值(χ_{lf})高达 $1597.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,约为一般海滩磁化率值的3~4倍。

(2)根据磁学参数将其分为3段,第III段由于受到粒度增加和成岩过程中有机质分解的影响,磁学参数整体比上两段小,且随深度增加不断减小。第II段和第I段 χ_{lf} 、SIRM指示磁性矿物含量多寡的参数值相对较高,表明磁性矿物含量较高,指示磁性矿物粒径的磁学参数 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{lf}}$ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 χ_{ARM} 值也相对较高,表明磁性矿物颗粒较细,结合 ^{210}Pb 和粒度结果可知,由于沉积水动力条件相对较弱,沉积环境相对稳定,有利于细颗粒的磁性矿物快速保存下来。

致谢:感谢王双实验员、陈莹璐硕士在磁学参数测试分析过程中给予的帮助,感谢夏威夷研究员、范迪实验员在铅测年和稳定碳同位素测试方面的帮助,感谢张卫国教授给予文章的宝贵修改建议。

参考文献 (References)

- [1] 黄婧, 孙立广, 王新明, 等. 西南极菲尔得斯半岛海豹粪土沉积物有机地球化学特征[J]. 极地研究, 2011, 23(1): 35-41. [HUANG Jing, SUN Liguang, WANG Xinming, et al. Organic geochemistry of seal excrement sediment from Fildes Peninsula, Western Antarctica [J]. Chinese Journal of Polar research, 2011, 23(1): 35-41.]
- [2] 刘晓收, 王晓晓, 王璐, 等. 南极菲尔得斯半岛潮间带小型底栖动物初步研究[J]. 极地研究, 2020, 32(3): 281-289. [LIU Xiaoshou, WANG Xiaoxiao, WANG Lu, et al. A preliminary study of intertidal Meiofauna in Fildes Peninsula, Antarctica [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2020, 32(3): 281-289.]
- [3] Sun L G, Xie Z Q, Zhao J L. A 3, 000-year record of penguin populations [J]. *Nature*, 2000, 407(6806): 858.
- [4] Wang J J, Wang Y H, Wang X M, et al. Penguins and vegetations on Ardley Island, Antarctica: evolution in the past 2400 years [J]. *Polar Biology*, 2007, 30(11): 1475-1481.
- [5] Lu Z B, Cai M H, Wang J, et al. Baseline values for metals in soils on Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica: the extent of anthropogenic pollution [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 184(11): 7013-7021.
- [6] Fabri-Jr R, Krause M, Dalfior B M, et al. Trace elements in soil, lichens, and mosses from Fildes Peninsula, Antarctica: spatial distribution and possible origins [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(4): 124.
- [7] Na G S, Liu C Y, Wang Z, et al. Distribution and characteristic of PAHs in snow of Fildes Peninsula [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(9): 1445-1451.
- [8] Na G S, Gao Y Z, Li R J, et al. Occurrence and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmosphere and soil from 2013 to 2019 in the Fildes Peninsula, Antarctica [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 156: 111173.
- [9] Li H J, Fu J J, Zhang A Q, et al. Occurrence, bioaccumulation and long-range transport of short-chain chlorinated paraffins on the Fildes Peninsula at King George Island, Antarctica [J]. *Environment International*, 2016, 94: 408-414.
- [10] 谢周清, 孙立广, 刘晓东, 等. 近2000年来南极菲尔得斯半岛西湖沉积物中稀土元素 $1/\delta\text{Eu}$ 特征与气候演变[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 303-306. [XIE Zhouqing, SUN Liguang, LIU Xiaodong, et al. The characteristic of $1/\delta\text{Eu}$ in the sediments of west lake with respect to climate change during the past 2000 Years, Fildes Peninsula, Antarctica [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2): 303-306.]
- [11] 李小梅, 袁宝印, 赵俊琳. 南极菲尔得斯半岛全新世以来湖泊沉积的环境演变研究[J]. 极地研究, 2002, 14(1): 35-43. [LI Xiaomei, YUAN Baoyin, ZHAO Junlin. Holocene environmental change delivered from lake core in Fildes Peninsula of King George island, Antarctic [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2002, 14(1): 35-43.]
- [12] Liu Q, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: principles and applications [J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): 1-50.
- [13] Evans M E, Heller F. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics* [M]. San Diego: Academic Press, 2003.
- [14] 邓成龙, 袁宝印, 胡守云, 等. 环境磁学某些研究进展评述[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 93-101. [DENG Chenglong, YUAN Baoyin, HU Shouyun, et al. Environmental magnetism: a review [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2000, 20(2): 93-101.]

- [15] Oldfield F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 (B5): 9045-9050.
- [16] Watkins S J, Maher B A. Magnetic characterization of present-day deep-sea sediments and sources in the North Atlantic [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 214 (3-4): 379-394.
- [17] 霍城, 李盼盼, 葛林科, 等. 南极南设得兰群岛附近海域表层沉积物中有色溶解有机物的分布特征及来源分析[J]. 极地研究, 2016, 28 (4): 484-490. [HUO Cheng, LI Panpan, GE Linke, et al. Distribution and source of chromophoric dissolved organic matter in the surface sediment from the sea area surrounding the South Shetland islands, Antarctica [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2016, 28 (4): 484-490.]
- [18] 孙立广, 谢周清, 刘晓东, 等. 西南极乔治王岛和东南极拉斯曼丘陵典型无冰区概述-南极无冰区生态地质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. [SUN Liguang, XIE Zhouqing, LIU Xiaodong, et al. An Overview of Typical Ice-free Areas in the Geowang Island and Lasman Hills in the Southwest Pole and the Southeast Pole, Ecological Geology of Ice-free Areas in Antarctica [M]. Beijing: science press, 2006.]
- [19] 王自磐, Peter H U, Pfeiffer S. 南极菲尔德斯半岛海鸟与种群分布 [J]. 极地研究, 2004, 16 (4): 271-280. [WANG Zipan, Peter H U, Pfeiffer S. Species and distribution of the birds on Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2004, 16 (4): 271-280.]
- [20] 赵烨. 南极乔治王岛菲尔德斯半岛土壤与环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1999. [ZHAO Ye. The Soil and Environment in the Fildes Peninsula of King George Island, Antarctica [M]. Beijing: China Ocean Press, 1999.]
- [21] 张凯棣, 李安春, 卢健, 等. 东海陆架沉积物环境磁学特征及其物源指示意义[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48 (2): 246-257. [ZHANG Kaidi, LI Anchun, LU Jian, et al. Magnetic property of the East China Sea sediment: indication to the provenance [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48 (2): 246-257.]
- [22] Warrier A K, Mahesh B S, Mohan R, et al. Glacial-interglacial climatic variations at the Schirmacher Oasis, East Antarctica: The first report from environmental magnetism [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 412: 249-260.
- [23] Zhang Q, Liu Q, Li J, et al. An integrated study of the eolian dust in pelagic sediments from the North Pacific Ocean based on environmental magnetism, transmission electron microscopy, and diffuse reflectance spectroscopy [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123 (5): 3358-3376.
- [24] 吕双燕, 金秉福, 贺世杰, 等. 莱州湾-龙口湾表层沉积物有机质特征及来源分析[J]. 环境化学, 2017, 36 (3): 650-658. [LV Shuangyan, JIN Bingfu, HE Shijie, et al. Characteristics and sources of organic matter in surface sediments of Laizhou Bay and Longkou Bay [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36 (3): 650-658.]
- [25] 孙萱, 宋金明, 于颖, 等. 元素分析仪快速测定海洋沉积物TOC和TN的条件优化[J]. 海洋科学, 2014, 38 (7): 14-19. [SUN Xuan, SONG Jinming, YU Ying, et al. A rapid method for determining the total organic carbon and total nitrogen in marine sediments with an elemental analyzer [J]. Marine Sciences, 2014, 38 (7): 14-19.]
- [26] 夏威岚, 薛滨. 吉林小龙湾沉积速率的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 年代学方法测定 [J]. 第四纪研究, 2004, 24 (1): 124-125. [XIA Weilan, XUE Bin. The ^{210}Pb and ^{137}Cs chronological measurement on sedimentation rate of Xiaolongwan, Jilin [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24 (1): 124-125.]
- [27] Hoffmann V, Knab M, Appel E. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 66 (1-2): 313-326.
- [28] 彭俊, 陈洪全, 马随随, 等. 黄河三角洲潮滩沉积物磁性特征与沉积环境分析[J]. 地理科学, 2014, 34 (10): 1262-1269. [PENG Jun, CHEN Hongquan, MA Suisui, et al. Magnetic properties of sediment and sedimentary environment in tidal flat of the Yellow River Delta [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34 (10): 1262-1269.]
- [29] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义[J]. 地球物理学报, 2009, 52 (4): 1041-1048. [LIU Qingsong, DENG Chenglong. Magnetic susceptibility and its environmental significances [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52 (4): 1041-1048.]
- [30] Maher B A, Taylor R M. Formation of ultrafine-grained magnetite in soils [J]. *Nature*, 1988, 336 (6197): 368-370.
- [31] Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, 13 (4): 260-267.
- [32] Dunlop D J. Theory and application of the day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc). 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107 (B3): 4-22.
- [33] Dunlop D J. Theory and application of the day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc). 2. Application to data for rocks, sediments, and soils [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107 (B3): 5-15.
- [34] 李波, 王艳, 钟和贤, 等. 花东海盆流沉积的磁性特征及其环境意义[J]. 地球物理学报, 2016, 59 (9): 3330-3342. [LI Bo, WANG Yan, ZHONG Hexian, et al. Magnetic properties of turbidites in the Huatung Basin and their environmental implications [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59 (9): 3330-3342.]
- [35] 朱日祥, 李春景, 吴汉宁, 等. 中国黄土磁学性质与古气候意义[J]. 中国科学: B辑, 1994, 24 (9): 992-997. [ZHU Rixiang, LI Chunjing, WU Hanning, et al. Magnetic properties and paleoclimatic significance of loess in China [J]. Science in China: B, 1994, 24 (9): 992-997.]
- [36] 李萍. 冲绳海槽沉积物磁性特征及其与环境的关系 [D]. 中国海洋大学, 2005. [LI Ping. Magnetic properties of sediments from the Okinawa trough and their relationship to sedimentary environment [D]. Doctor Dissertation of Ocean university of China, 2005.]
- [37] Roberts A P. Magnetic properties of sedimentary greigite(Fe_3S_4) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 134 (3-4): 227-236.
- [38] Liu X D, Li H C, Sun L G, et al. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in the ornithogenic sediments from the Antarctic maritime as palaeoecological proxies during the past 2000 yr [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243 (3-4): 424-438.
- [39] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism [M]. London: Oldfield, 1986.
- [40] 潘永信, 邓成龙, 刘青松, 等. 趋磁细菌磁小体的生物矿化作用和磁学性质研究进展[J]. 科学通报, 2004, 49 (24): 2563-2568. [PAN Yongxin, DENG Chenglong, LIU Qingsong, et al. Biomineralization

- and magnetism of bacterial magnetosomes [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49 (24): 2563-2568.]
- [41] 谢又予. 中国南极长城站地区(菲尔德斯半岛)地貌与沉积 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993. [XIE Youyu. Geomorphology and Deposition in the Great Wall Station Area (Fildes Peninsula) in Antarctica, China[M]. Beijing: Ocean Press, 1993.]
- [42] 卢良兆, 许文良. 岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 2011. [LU Liangzhao, XU Wenliang. Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.]
- [43] Zhang W G, Xing Y, Yu L Z, et al. Distinguishing sediments from the Yangtze and Yellow Rivers, China: a mineral magnetic approach [J]. *The Holocene*, 2008, 18 (7): 1139-1145.
- [44] Chaparro M A E, Nuñez H, Lirio J M, et al. Magnetic screening and heavy metal pollution studies in soils from Marambio Station, Antarctica [J]. *Antarctic Science*, 2007, 19 (3): 379-393.
- [45] Bandaru V L, Gawali P B, Hanamgond P T, et al. Heavy metal monitoring of beach sands through environmental magnetism technique: a case study from Vengurla and Aravali beaches of Sindhudurg district, Maharashtra, India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75 (8): 678.
- [46] Pratama A, Bijaksana S, Abdurrahman M, et al. Rock Magnetic, Petrography, and Geochemistry Studies of Lava at the Ijen Volcanic Complex (IVC), Banyuwangi, East Java, Indonesia [J]. *Geosciences*, 2018, 8 (5): 183.
- [47] Kim W, Doh S J, Yu Y, et al. Magnetic evaluation of sediment provenance in the northern East China Sea using fuzzy c-means cluster analysis [J]. *Marine Geology*, 2013, 337: 9-19.
- [48] Wang Y H, Huang Q H, Lemckert C, et al. Laboratory and field magnetic evaluation of the heavy metal contamination on Shilaoren Beach, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 117 (1-2): 291-301.
- [49] 张卫国, 俞立中. 长江口潮滩沉积物的磁学性质及其与粒度的关系 [J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2002, (9): 783-792. [ZHANG Weiguo, YU Lizhong. Magnetic properties of tidal flat sediments in the Yangtze Estuary and their relationship with grain size[J]. *Scientia Sinica(Series D: Earth Sciences)*, 2002, (9): 954-966.]
- [50] 刘健. 磁性矿物还原成岩作用述评[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20 (4): 103-107. [LIU Jian. Reductive diagenesis of magnetic minerals: a review [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2000, 20 (4): 103-107.]