

邹庆超, 石学法, 葛淑兰, 等. 氧同位素 3 早期以来千年尺度气候事件在日本海北部的磁学记录[J]. 海洋学报, 2024, 46(4): 106–121, doi:10.12284/hyxb2024029

Zou Qingchao, Shi Xuefa, Ge Shulan, et al. Magnetic recordings of millennium-scale climate events in the northern Japan Sea since the early MIS 3[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(4): 106–121, doi:10.12284/hyxb2024029

# 氧同位素 3 早期以来千年尺度气候事件 在日本海北部的磁学记录

邹庆超<sup>1</sup>, 石学法<sup>1,2</sup>, 葛淑兰<sup>1,2</sup>, 吴永华<sup>1,2</sup>, 邹建军<sup>1,2</sup>, 贺湘锋<sup>3</sup>,  
Sergey A. Gorbarenko<sup>4</sup>, 刘建兴<sup>1,2\*</sup>

(1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用自然资源部重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 青岛海洋科技中心 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 4. 俄罗斯科学院 远东分院 太平洋研究所, 俄罗斯符拉迪沃斯托克 690041)

**摘要:** 日本海是西北太平洋最大的边缘海, 长期以来普遍认为其沉积物处于强烈的还原环境中而导致相应的磁学信号非常微弱, 以致常用的磁学方法在该区的应用一直受限。为深入探讨磁学指标在日本海古环境与古海洋学研究中是否有效, 本文对位于研究程度相对薄弱的北部一根 626 cm 长的柱状沉积物岩心 (LV87-2-3 孔, 水深 740 m) 开展了系统的岩石磁学测试分析以及高分辨率的 AMS<sup>14</sup>C 测年和粒度分析。结果显示岩心系约 48.3 ka BP 以来的沉积记录, 其 55 cm 以下层位原生亚铁磁性矿物 (主要为磁铁矿) 已被大量还原而生成黄铁矿, 导致磁性极弱。这与 Dansgaard-Oeschger (D-O) 旋回间冰阶水体分层加强和表层生产力提高等因素密切相关。然而, 在此背景下仍存在 4 个以高矫顽力矿物 (如赤铁矿和针铁矿) 占比较高为明显特征的强磁性层位, 即“硬磁异常”层; 其很好地对应了海因里希 (Heinrich) 事件, 指示了东亚冬季风 (EAWM) 增强和高盐度对马暖流 (TWC) 注入而导致的相对减弱的还原环境。上述变化在沉积物粒度上却未见清晰体现。因此, 该研究不仅表明磁学参数对于指示末次冰期日本海古海洋与古环境演化的作用不容忽视, 同时也为后续相关工作提供了新视角和新思路。

**关键词:** 日本海沉积物; 磁性矿物; 岩石磁学; 古环境; Heinrich 事件

中图分类号: P736.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)04-0106-16

## 1 引言

作为西北太平洋一个典型的边缘海, 日本海是探索东亚季风形成与演变、全球海平面变化与冰川和高原隆升等耦合关系的重要窗口<sup>[1-3]</sup>。一方面, 日本海沉积物通常以厘米-分米级富有机质暗色层和生物扰动强烈的浅色层周期性交替出现, 是研究轨道-千年

尺度气候事件和西太平洋洋流活动的理想材料<sup>[4-5]</sup>; 另一方面, 日本海位于西风环流和东亚季风 (East Asian Monsoon, EAM) 的下风区, 其沉积物中的风尘组分对于亚洲内陆干湿环境演化和北半球大气环流状况以及西风急流轴的空间摆动都具有重要的指示意义<sup>[6-9]</sup>。另外, 日本海西北部还发育有千年尺度变化的海冰, 其对海盆深层水的形成和演化以及中高纬度沉积物

收稿日期: 2024-01-15; 修订日期: 2024-03-07。

基金项目: 中央级公益科研院所基本科研业务费专项项目 (2021S01); 国家自然科学基金项目 (U1606401, 41976078)。

作者简介: 邹庆超 (1999—), 男, 山东省聊城市人, 主要从事海洋地质方面研究。E-mail: 17852158833@163.com

\* 通信作者: 刘建兴 (1987—), 男, 山东省临沭县人, 博士, 研究员, 主要从事古地磁与环境磁学研究。E-mail: jxliu@fio.org.cn

的运移和气候模式等亦具有显著的调控作用<sup>[10-11]</sup>。

日本海的古环境与古海洋研究最早可追溯至 20 世纪 60 年代,特别是在近 30 年以来取得了显著成果,例如:在轨道-千年尺度上,研究人员通过构建日本海沿岸海冰的扩张模型,发现对马暖流(Tsushima Warm Current, TWC)导致日本海南部海表温度和东亚夏季风(East Asian Summer Monsoon, EASM)的相关性并不明显,而 60°N 太阳辐射量是控制东亚冬季风(East Asian Winter Monsoon, EAWM)强度的关键因素,且千年尺度的气候事件仍可与东亚季风强度耦合<sup>[12-15]</sup>;另外,还有研究发现日本海的底流活动自 8 ka BP 增强,对马暖流和利曼寒流的强度接近现代水平,表现为东部和南部海表盐度和氧含量的显著增加<sup>[16-18]</sup>。然而,以上研究主要集中于日本海中部和南部,北部地区的相关研究程度明显滞后,严重限制了对日本海古海洋与古环境演化历史的整体认识和理解。

从研究手段来看,已有研究主要基于矿物学和地球化学等指标<sup>[19]</sup>,鲜见磁学相关的报道。作为应用岩石磁学参数来重塑环境演化历史的一个分支学科,环境磁学方法具有样品用量少、灵敏度高、简单快速、无损性等显著优势<sup>[20]</sup>,在古环境与古气候相关研究中发挥了重要作用<sup>[21-23]</sup>。相比而言,在这面对日本海的研究却十分薄弱,主要原因在于其沉积物长期处于硫化还原环境,其中大部分原生亚铁磁性组分已被改造成顺磁性的黄铁矿,导致磁学信号非常微弱,传统仪器很难对其进行有效测量<sup>[19]</sup>。然而,近年来随着磁学测试技术和相应仪器精度的不断提高,越来越多的弱磁性样品的信号被准确检测<sup>[24-26]</sup>。此外,近期越来越多的研究发现在高沉积速率的海洋(如陆架-边缘海)环境中次生铁硫化物通常在沉积后很快的时间内形成<sup>[27-28]</sup>,可近似视为同沉积的产物,具有很好的环境指示意义<sup>[29-31]</sup>。这都为在日本海开展系统的环境磁学研究奠定了重要的理论和方法基础。

综上所述,自 20 世纪 90 年代,日本海古海洋与古环境研究在取得重要进展的同时,也存在明显的不足之处:其一体现在区域研究的不平衡性,即大部分研究集中于中-南部,北部的研究程度明显薄弱;其二则是研究手段比较单一,多数研究基于地球化学和矿物学指标,而相对简易的磁学方法并未得到有效应用。鉴于此,本文以取自日本海北部的一个沉积物岩心为研究对象,在准确建立其年代框架的基础上,对其开展高分辨率的岩石磁学测试分析,并结合部分沉积学指标,深入探索环境磁学参数对该区古海洋与古环境条件变化的响应及可能的机制。本研究有望

进一步提升对日本海末次冰期沉积环境演化的系统认识并为后续相关研究提供新视角和新思路。

## 2 区域概况

日本海位于 32°42'~52°14'N, 127°20'~142°15'E 之间,面积约为 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>,平均水深约为 1 350 m,最大水深约为 3 740 m,系西北太平洋最大的边缘海<sup>[5, 32-33]</sup>;其东部边界北起库页岛,日本列岛的北海道、本州和九州,西部边界为欧亚大陆的俄罗斯远东地区,南部则以朝鲜半岛为界;此外,日本海大陆架较狭窄,海底主要是深水海盆,自北向南分别是日本海盆、大和海盆以及对马海盆(又称郁陵海盆)(图 1)<sup>[32]</sup>。日本海北部通过鞆鞆海峡(水深 15 m)以及宗谷海峡(水深 55 m)与鄂霍次克海联通,通过津轻海峡(水深 130 m)以及对马海峡(水深 130 m)与西太平洋联通<sup>[3, 32]</sup>,其海峡基底深度与末次盛冰期(Last Glacial Maximum, LGM)海平面最大下降值相对应<sup>[2]</sup>。这种地理格局使日本海受到对马暖流、利曼寒流以及亲潮的共同影响。对马暖流是黑潮的一个分支,为日本海带来丰富的热量和营养物质<sup>[16]</sup>,进入日本海后又分为 3 支,其中两支沿着日本列岛的西缘向北流动,一支沿着朝鲜半岛向西北流动,在西风的作用下在 38°N 发生东偏<sup>[34]</sup>。利曼寒流发源于鄂霍次克海,通过鞆鞆海峡注入日本海并与对马暖流在 40°N 相遇形成极锋带<sup>[35-36]</sup>。由于津轻海峡低盐度的地表水与开阔太平洋水体的巨大差异,亲潮会在斜压作用下沿着津轻海峡涌入,直沉海底形成深层水<sup>[3, 37]</sup>。

日本海处于西风环流和东亚冬季风的下风区,加之又没有大型河流注入,沉积物中粉尘物质的贡献显著<sup>[8, 38]</sup>;其沉积物中常见的深-浅色纹层交替现象具有明显的千年尺度震荡特征,被认为与格陵兰冰盖第二计划(Greenland Ice Sheet Project Two, GISP2)所记录的北大西洋丹斯伽阿德-厄施格尔(Dansgaard-Oeschger, D-O)旋回有关,且越往北该特征越明显<sup>[4, 39-40]</sup>。D-O 旋回和亚洲季风千年尺度的变化密切相关,这种遥相关是西风急流传递北大西洋经向翻转流(Atlantic Meridional Overturning Current, AMOC)变化信号到北太平洋的重要体现<sup>[41]</sup>。西风急流的千年尺度震荡与东亚季风的强弱和空间格局联系密切<sup>[12]</sup>,可导致不同时期物源的变化<sup>[42]</sup>;同时,风尘沉降方式的不同也可导致日本海沉积物粒径发生较大的改变<sup>[43-44]</sup>。EAWM 源于西伯利亚和阿留申的气压差,可在日本海西北部俄罗斯沿岸上空形成冷气团,致使地表水冷却形成深水团,即日本海底层水(Japan Sea Proper Water, JSPW),

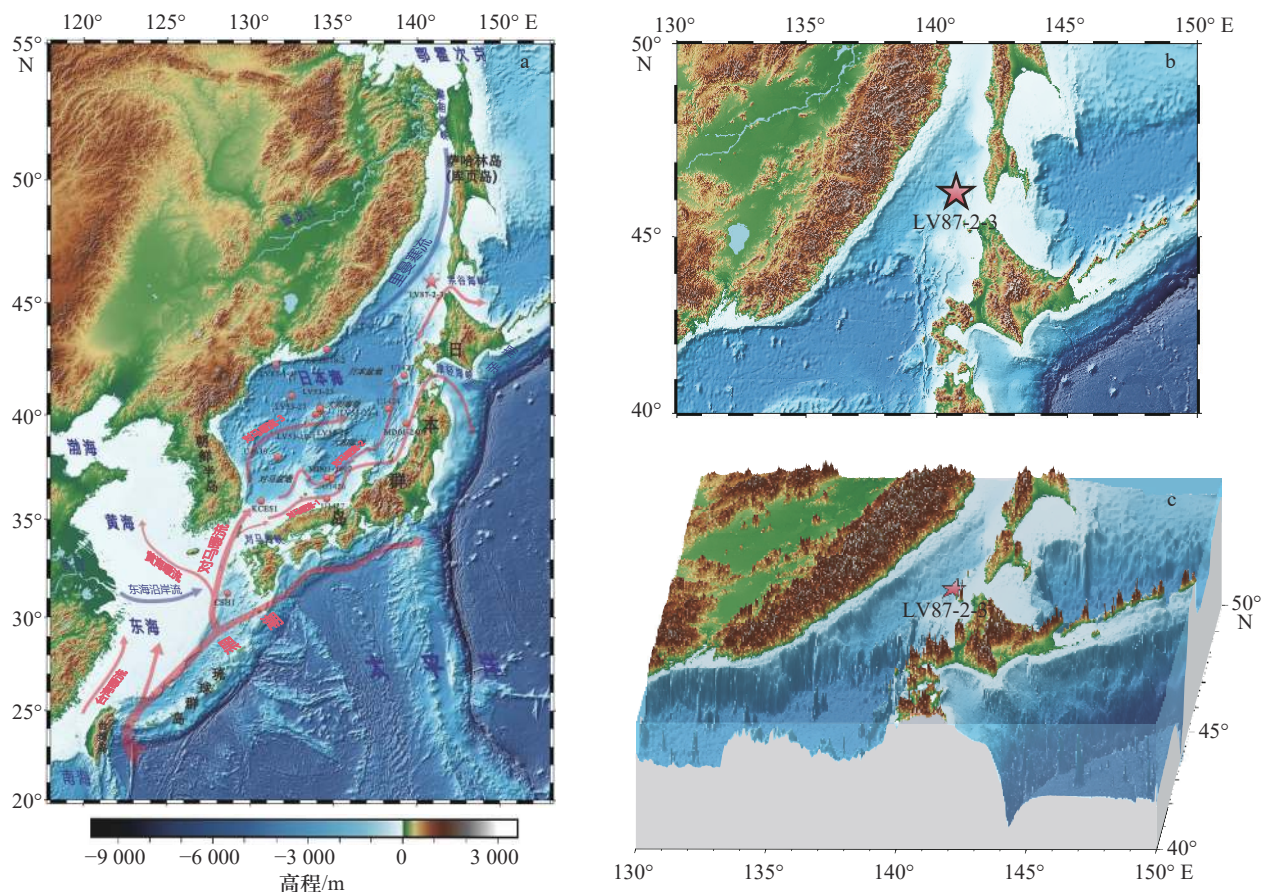


图 1 日本海及其周边区域概况和部分钻孔分布情况

Fig. 1 Regional settings of the Japan Sea and its surrounding area and the locations of partial sediment cores

a. 日本海及其邻近区域的洋流分布, 蓝色箭头表示寒流, 红色箭头表示暖流; b, c. 本文所研究的 LV87-2-3 孔的位置及周边地理环境, b 为平面图, c 为立体图

a. Distribution of ocean currents in Japan Sea and its surrounding area, blue arrows show cold currents, while red arrows show warm currents; b, c. the location and surrounding geographical environment of LV87-2-3 core researched in this paper, b is a plan view, while c is a 3D view

并携带表层富氧水体下沉, 加强垂直通风<sup>[3, 45]</sup>。此外, EASM 带来的丰沛降水, 不仅调节了日本海上层水体的盐度, 还会通过 TWC 搬运东亚周边河流物质和营养盐至日本海, 进而改变水体的物化性质<sup>[45]</sup>。

### 3 材料与方 法

#### 3.1 研究材料

本文研究材料为 LV87-2-3 孔柱状沉积物岩心, 钻孔地理坐标 (46°8.4'N, 140°44.4'E), 位于日本海北部宗谷海峡以西对马暖流和利曼寒流共同影响区域, 水深 740 m (图 1)。该孔系自然资源部第一海洋研究所与俄罗斯科学院远东分院太平洋海洋研究所在 2019 年实施中-俄日本海联合调查航次期间, 利用“拉夫维杰耶夫院士”号科学考察船采用重力取样方式钻取。钻孔进尺深度为 650 cm, 获得岩心总长亦为 650 cm, 即采取率为 100%, 然而由于岩心底部 24 cm 受刀口影响扰动明显, 不宜采集古地磁方盒样品, 故本文只

对上部 626 cm 进行样品采集研究, 因此后文中的 LV87-2-3 孔均代指岩心上部 0~626 cm 层位。将岩心沿中轴线剖开, 首先进行拍照和描述: 沉积物主要由灰色-灰绿色黏土质粉砂组成, 偶见粉砂质黏土薄层, 肉眼未发现岩性明显突变现象; 岩心 60 cm 以浅层位呈现界限模糊且伴有条带状杂色的浅色层, 而 60 cm 以深层位则以稳定沉降且层次分明的厘米级明暗交替平行层理为特征 (图 2a); 其后, 分别利用 X 射线荧光扫描仪 (XRF) 和分光测色计对半管岩心进行元素扫描和反射光谱测定。岩心和后续分样过程获得的样品均长期保存于 4℃ 环境中。

#### 3.2 分析方法

以 4 cm 为间距共选取 156 个层位的样品进行粒度分析。首先, 取适量沉积物放入离心管, 加入 20 mL 15% 的双氧水浸泡 12 h 后, 再 80℃ 水浴 4 h, 直至上层液体清澈, 即有机质被彻底去除; 之后加入 5 mL 10% 的稀盐酸静置 12 h 充分去除碳酸盐, 并用去离子

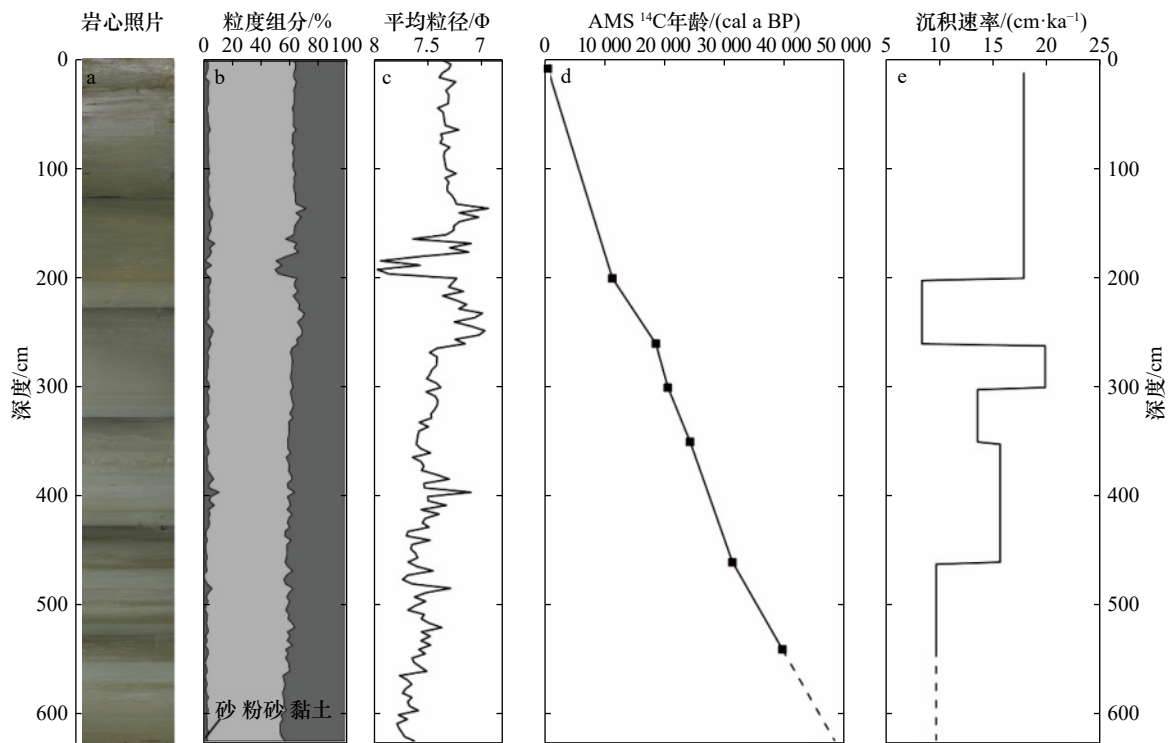


图 2 日本海北部 LV87-2-3 孔岩心的基本沉积学特征和年龄框架

Fig. 2 Basic sedimentological characteristics and age model of the studied sediment Core LV87-2-3 from the northern Japan Sea

- a. 岩心照片; b. 岩心沉积物三组分相对含量随深度的变化; c. 岩心平均粒径随深度的变化; d. 岩心 AMS<sup>14</sup>C 年龄(实心方块)随深度的变化(图中虚线为根据最下方两个测年点的线性外推); e. 根据 AMS<sup>14</sup>C 年龄恢复的钻孔不同时期的平均沉积速率随深度的变化
- a. Photograph of the core; b. the variations of the relative content of the three components of the sediment along with depth of the core; c. main grain-size; d. the AMS<sup>14</sup>C age of the core solid square, varies with depth (the dashed lines in the figure are linear extrapolations from the bottom two dating points); e. main sedimentation rate in different periods of the sediment core based on AMS<sup>14</sup>C age, along with depth of the core

水清洗 3 次;最后,加入 15 mL 2 mol/L 的碳酸钠溶液去除硅藻,同样用去离子水清洗 3 次。上述预处理工作完成后,将样品超声振荡分散,在 Mastersizer 3000 型激光粒度仪上进行测试。仪器测量范围为 0.01~3 500 μm, 粒径分辨率为 0.01Φ。该项工作在自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室完成。

为建立岩心的年龄框架,参考分样前岩心的元素扫描结果,从 8 个 Ca 含量明显较高的层位选取适量沉积物进行浮游有孔虫壳体挑选。其后,将获得的有孔虫壳体(质量均在 8 mg 以上)邮寄至美国 Beta 实验室,在加速器质谱仪(Accelerator Mass Spectrometer, AMS)上测量相应的<sup>14</sup>C 年龄。运用 Calib 8.20 软件将测得的 AMS<sup>14</sup>C 年龄数据转换为日历年龄。年龄转换时采用目前最新的 MARINE20 曲线<sup>[46]</sup>,并将本海域对全球海洋碳储库偏离量(ΔR)设为 ΔR = (-84 ± 30) a<sup>[47]</sup>。

利用 2 cm × 2 cm × 2 cm 尺寸的无磁性塑料盒沿岩心进行连续采样,共获得 313 个定向样品并称重。在崂山实验室海洋地质过程与环境功能实验室,利用捷克 AGICO 公司生产的 MFK2-FA 旋转型多频卡帕

桥磁化率仪测量样品的低频(976 Hz, 灵敏度为  $2 \times 10^{-8}$  SI)体积磁化率( $\kappa$ ),并进行质量归一化得到质量磁化率( $\chi$ )。随后,在自然资源部第一海洋研究所海洋检测中心古地磁实验室,利用超导磁力仪(2G-755-4K 型)在 80 mT 交变场并叠加 0.05 mT 直流场获得非磁滞剩磁(Anhysteretic Remanent Magnetization, ARM)。最后,利用 2G-660 型脉冲磁力仪上对样品依次施加 1 T 正向场、0.1 T 和 0.3 T 反向场,并在超导磁力仪上测量相应的等温剩磁(Isothermal Remanent Magnetization, IRM),分别记为 SIRM(Saturation IRM)、IRM<sub>-0.1 T</sub> 和 IRM<sub>-0.3 T</sub>, S 比值根据公式  $S_{-0.1 T/-0.3 T} = (1 - \text{IRM}_{-0.1 T/-0.3 T})/2$ <sup>[48]</sup> 计算求得;高矫顽力磁性组分的含量以 HIRM(即 Hard/High-coercivity IRM)表示,本文报道的  $\text{HIRM}_{-0.1 T/-0.3 T} = (\text{SIRM} + \text{IRM}_{-0.1 T/-0.3 T})/2$ 。

以 4~6 cm 间距选取 126 个样品在崂山实验室海洋地质过程与环境功能实验室进行磁滞参数测量:取适量沉积物在室温下充分干燥并轻微研磨,将约 200 mg 沉积物装入特制胶囊壳中用棉花塞紧;利用美国 LakeShore 公司生产的 8604 型振动样品磁强计测量

磁滞回线(Loop),最高场设为 $\pm 1$  T,间距为 5 mT,平均观测时间为 500 ms,通过顺磁校正,得到矫顽力( $B_c$ )、饱和磁化强度( $M_s$ )和饱和等温剩磁( $M_{rs}$ );随即以 2 mT 的场间距进行反向场退磁得到剩磁矫顽力( $B_{cr}$ )。之后,根据以上所得磁学数据的变化特征,挑选 3 个代表性样品进行一阶反转曲线(First-order Reversal Curve, FORC)和 IRM 获得曲线测量:每个样品测量 120 条 FORC,应用 FORCinel 软件(1.18 版本)<sup>[49]</sup>进行数据处理得到相应的 FORC 图<sup>[50]</sup>,平滑因子选择为 5;IRM 获得曲线在非线性(对数)模式下等间距测量 100 个数据点,并采用 Heslop 等<sup>[51]</sup>的方法对其梯度进行矫顽力谱分解;以上测量所用的饱和场和平均观测时间均为 1 T 和 500 ms。最后,在中国地质科学院地质力学研究所利用美国 Quantum Design 公司生产的磁学特征测量系统(MPMSXL3)对上述 3 个代表性样品进行低温磁学测量:首先,称取约 100 mg 经轻微研磨的干样装入特制胶囊壳中并装入仪器;然后,在零磁场将样品中从 300 K 冷却至 20 K,对其施加 2.5 T 的磁场;最后,撤掉磁场,以约 2 K/min 步长升温至 300 K,并测量该过程中 IRM 随温度的变化曲线。

## 4 实验结果

### 4.1 粒度分析和年代框架

粒度分析结果显示岩心沉积物主要为粉砂粒级,含量变化在 49%~67%(平均为 58%),黏土粒级次之,含量在 28%~50%(平均为 39%),砂质粒级组分含量最低,其平均含量仅为 3%;以上粒级 3 组分含量随深度的变化整体较小,仅在个别层位(即 180~200 cm)发生微小的波动,表现为黏土粒级组分含量的增加(图 2b);同样地,岩心的平均粒径变化范围为 7.98~

6.94  $\Phi$ ,平均值为 7.45  $\Phi$ (对应于 3.97~8.17  $\mu\text{m}$ ,平均为 5.79  $\mu\text{m}$ ;如图 2c 所示)。因此,岩心沉积物整体上为黏土质粉砂,仅 180~200 cm 层位为粉砂质黏土。

岩心的 AMS<sup>14</sup>C 测年信息和结果详见表 1。结果显示所测 8 个层位的年龄值随深度均依次增加,未见颠倒现象(图 2d,表 1),表明测年结果的高度可靠性。岩心顶部 7~13 cm 层位的年龄(约 400 a BP)指示其表层沉积物接近现代沉积,即顶部在钻取过程中未明显流失。根据 461~462 cm 和 541~542 cm 层位的两个年龄所确定的平均沉积速率线性外推得到岩心的底界年龄约为 48.3 ka BP,对应时代为深海氧同位素 3(MIS 3)早期,整个岩心的平均沉积速率约为 13 cm/ka。需要注意的是,当沉积物年龄超过 25 ka 后,其<sup>14</sup>C 测年数据容易受到轻碳的污染而使得测试结果变轻<sup>[52-53]</sup>,这也是目前陆架边缘海沉积物<sup>14</sup>C 测年共同面临的问题,本文岩心下部的测年材料为浮游有孔虫单一属的完整且洁净的壳体,在一定程度上降低了这种误差。另外,根据年龄控制点得到的各阶段沉积速率的变化范围基本在 1 倍以内(图 2e),表明研究区近 50 ka 以来的沉积过程相对稳定。

### 4.2 磁学参数和磁性矿物判别

钻孔岩石磁学参数随深度的变化趋势如图 3 所示。首先,常用来表征磁性矿物含量的 3 个参数(即  $\chi$ 、ARM、SIRM)均在岩心上部 0~55 cm 层位表现为明显高值,而在 55~65 cm 层位则快速下降并接近最低值,其下仅见 4 个层位(即 A1: 342~357 cm、A2: 387~403 cm、A3: 413~439 cm、A4: 515~537 cm)呈现相对高值(图 3a 至图 3c)。这表明 55 cm 以深层位的原生磁性组分(主要应为磁铁矿)被强烈还原,大部分已转化为顺磁性的黄铁矿,与日本海已有报道类似<sup>[9]</sup>。同

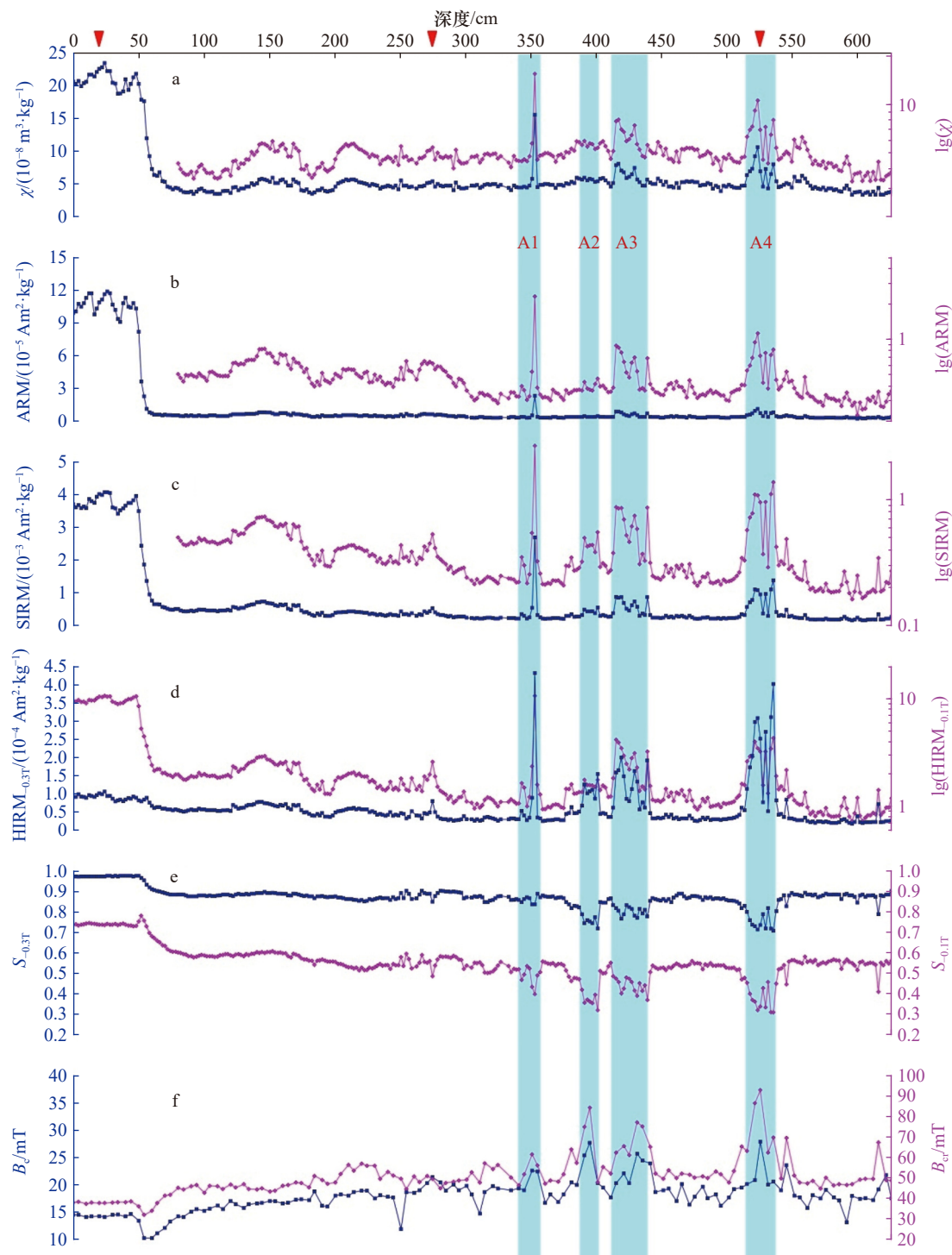
表 1 LV87-2-3 孔岩心的 AMS<sup>14</sup>C 测年结果  
Table 1 The results of AMS<sup>14</sup>C dating from the sediment Core LV87-2-3

样品编号	深度/cm	测年材料	种属	测量值/a BP	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	传统年龄/(a BP)	日历年龄/(cal a BP)	
							置信区间/ $1\sigma$	截距值
672259	7~13	浮游有孔虫	<i>Pachyderma; Bulloides</i>	470 ± 30	-0.3	870 ± 30	334~475	405
610375	201~202	浮游有孔虫	<i>Pachyderma; Bulloides</i>	9 760 ± 30	-0.5	10 160 ± 30	11 119~11 271	11 203
610376	261~262	浮游有孔虫	<i>Pachyderma</i>	15 510 ± 50	-0.3	15 910 ± 50	18 342~18 608	18 472
610377	301~302	浮游有孔虫	<i>Pachyderma</i>	17 230 ± 60	+0.1	17 640 ± 60	20 357~20 624	20 494
610378	351~352	浮游有孔虫	<i>Pachyderma</i>	20 490 ± 70	+0.1	20 900 ± 70	24 043~24 366	24 209
610379	461~462	浮游有孔虫	<i>Pachyderma</i>	27 580 ± 120	+0.0	27 990 ± 120	31 117~31 400	31 272
664989	541~542	浮游有孔虫	<i>Pachyderma</i>	34 990 ± 310	-0.4	35 370 ± 310	39 316~39 896	39 624
664990	621~622	浮游有孔虫	<i>Pachyderma</i>		-0.7	> 43 500		

样, 指示高矫顽力矿物浓度的 HIRM(图 3d) 和低矫顽力矿物相对含量的  $S$  比值(图 3e)在上述层位分别呈现高值和低值, 与矫顽力和剩磁矫顽力的变化也十分一致, 即具有较高的  $B_c$  和  $B_{cr}$  值(图 3f)。以上结果共同表明, 在岩心 55 cm 以深层位的原生磁性矿物被强烈还原而导致磁性显著减弱的大背景下, 仍存在一些相对强磁性层位; 其以相对较高的高矫顽力矿物含量为特征, 推测与高矫顽力矿物(如赤铁矿和针铁矿)在

还原条件下相对于磁铁矿更耐溶解有关<sup>[54]</sup>。最后, 结合 A1~A4 层位的氧化还原敏感元素 Mn 含量明显高于其相邻层位(如图 3g, 为尽量消除沉积物粒度对元素富集的影响, 此处以 Mn/Ti 示之), 初步判断这些层位所对应的沉积环境的氧化性相对升高<sup>[55-56]</sup>, 即还原性减弱。

代表性样品的 IRM 获得曲线显示岩心顶部未明显还原层位的样品在约 200 mT 场时接近饱和(图 4a),



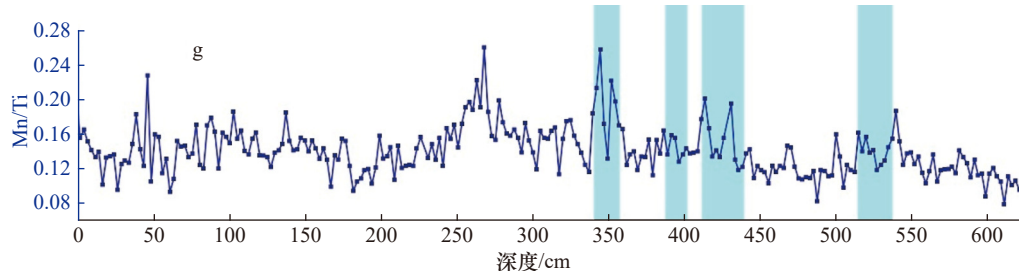


图3 日本海 LV87-2-3 孔岩心的岩石磁学参数以及氧化还原敏感元素 Mn 含量随深度的变化

Fig. 3 The variations of rock magnetic parameters and the contents of redox sensitive element Mn along with depth of the Core LV87-2-3 from the northern Japan Sea.

a. 质量磁化率( $\chi$ ); b. 非磁滞剩磁(ARM); c. 饱和等温剩磁(SIRM); d. 高矫顽力矿物含量(以 HIRM 表示; 蓝线和紫线分别代表反向场为 0.3 T 和 0.1 T(对数模式)对应的值); e. 低矫顽力矿物相对含量(以  $S$  比值表示; 蓝线和紫线分别代表反向场为 0.3 T 和 0.1 T 对应的值); f. 矫顽力( $B_c$ , 蓝线)和剩磁矫顽力( $B_{cr}$ , 紫线); g. 岩心 XRF 得到的氧化还原敏感元素 Mn 含量(为尽量消除粒度对元素富集程度的影响, 以 Mn/Ti 示之)。a-c. 蓝线和紫线分别为实际测量值与其相应的对数值(注: 对数模式中岩心上部强磁性层位未展示)。图中浅蓝色竖条带标出的为高矫顽力组分含量相对高的层位, 即后文中所指的“硬磁异常”层。图上方红色倒三角指示用来做进一步岩石磁学分析的 3 个代表样品的位置

a. Mass-specific magnetic susceptibility ( $\chi$ ); b. anhysteretic remanent magnetization (ARM); c. saturation isothermal remanent magnetization (SIRM); d. the content of hard/high-coercivity mineral (represented by HIRM; the blue and purple lines represent values corresponding to reverse fields of 0.3T and 0.1T (logarithmic mode), respectively); e. the relative content of low-coercivity mineral (represented by  $S$ -ratio; the blue line and purple lines represent values corresponding to the reverse fields of 0.3T and 0.1T, respectively); f. coercivity ( $B_c$ , blue line) and remanent coercivity ( $B_{cr}$ , purple line); g. the contents of redox sensitive element Mn derived from XRF measurement (indicated as Mn/Ti ratio to eliminate the effect of grain-size on element enrichment as far as possible). The blue and purple lines in a-c are the actual measured values and their corresponding pairs, respectively. The light blue vertical bands in the figure indicate the layers with relatively high content of high coercivity components, i.e., the layers referred to later as “hard magnetic anomalies” layers. The red inverted triangles at the top of the figure indicate the layers of the representative 3 samples used for further rock-magnetic analyses

对应矫顽力谱分解显示其主要组分对应的中值矫顽力为 50 mT, 另含极少量的高(约 250 mT)、低(约 10 mT)矫顽力组分(图 4d)。这与该层位明显高的  $S$  比值(图 3e)和低的(剩磁)矫顽力值(图 3f)吻合, 指示低矫顽力组分占主导。相比而言, 下部还原层位样品的 IRM 接近饱和的场值明显升高(图 4b, 图 4c), 与矫顽力谱分解一致(图 4e, 图 4f), 即高矫顽力组分占比明显增加, 特别是 HIRM 值异常高(图 3d)/ $S$  比值最低(图 3e)层位的高矫顽力组分占比最高(图 4f)。同时, 代表性样品的 FORC 图均清晰揭示单畴(Single-Domain, SD)磁学信号, 即同心环状分布的等值线<sup>[57]</sup>, 中心矫顽力约 12 mT(图 4g, 图 4i), 推测与日本海沉积物主要由风尘贡献而导致磁性矿物粒径整体较细有关<sup>[58]</sup>; 此外, 上部层位样品还显示了多畴(Multi-Domain, MD)信号, 即 FORC 等值线沿着纵轴大开口(图 4g)<sup>[58]</sup>; 而这一特征在下部层位却不明显(图 4h, 图 4i), 表明强烈的还原作用已将绝大部分磁铁矿改造, 包括相对耐溶的大颗粒磁铁矿<sup>[59]</sup>。类似地, HIRM 值异常高的样品的 FORC 等值线沿横轴的展布显著变宽(图 4i), 同样表明高矫顽力矿物在此类样品中的占比优势。此外, 岩心顶部未明显还原样品的低温曲线清晰揭示了 Verwey 转换, 表明磁铁矿的磁性主导性<sup>[60]</sup>; 然而,

其展布范围明显变宽, 呈现约 120 K 和约 100 K 两个转换温度(图 4j), 结合对应的 FORC 图特征(图 4g), 推断该类样品中除陆源碎屑型磁铁矿外, 还存在磁铁矿化石磁小体<sup>[61]</sup>, 以往研究已有类似报道<sup>[62]</sup>。相反, 下部明显还原层位的样品的 Verwey 转换却十分微弱(图 4k, 图 4l), 同样指示其中大部分磁铁矿已被强烈还原溶解, 可能仅存极其少量大颗粒磁铁矿。

总之, 根据上述岩石磁学结果可以判断: 岩心上部 0~55 cm 层位中原生磁性矿物未受明显还原改造, 主要磁性矿物为细粒(SD)磁铁矿(包括生物成因和非生物成因), 另含少量的高矫顽力矿物(如赤铁矿)和粗粒(MD)磁铁矿; 而 55 cm 以深层位的原生铁氧化物则被强烈还原, 导致磁性大幅度下降, 仅个别层位表现为相对强磁性, 指示高矫顽力矿物(如赤铁矿)含量相对较高。

## 5 讨论

### 5.1 末次冰期气候事件在钻孔中的记录

末次冰期以来, 日本海具有较低的海平面(图 5e), 高度还原环境下沉积米级厚度暗色层, 是全球气候轨道尺度变化的表现<sup>[5, 63]</sup>。大量研究表明, 在西风急流和东亚季风的协同影响下(如图 5f 至图 5h 所示), D-

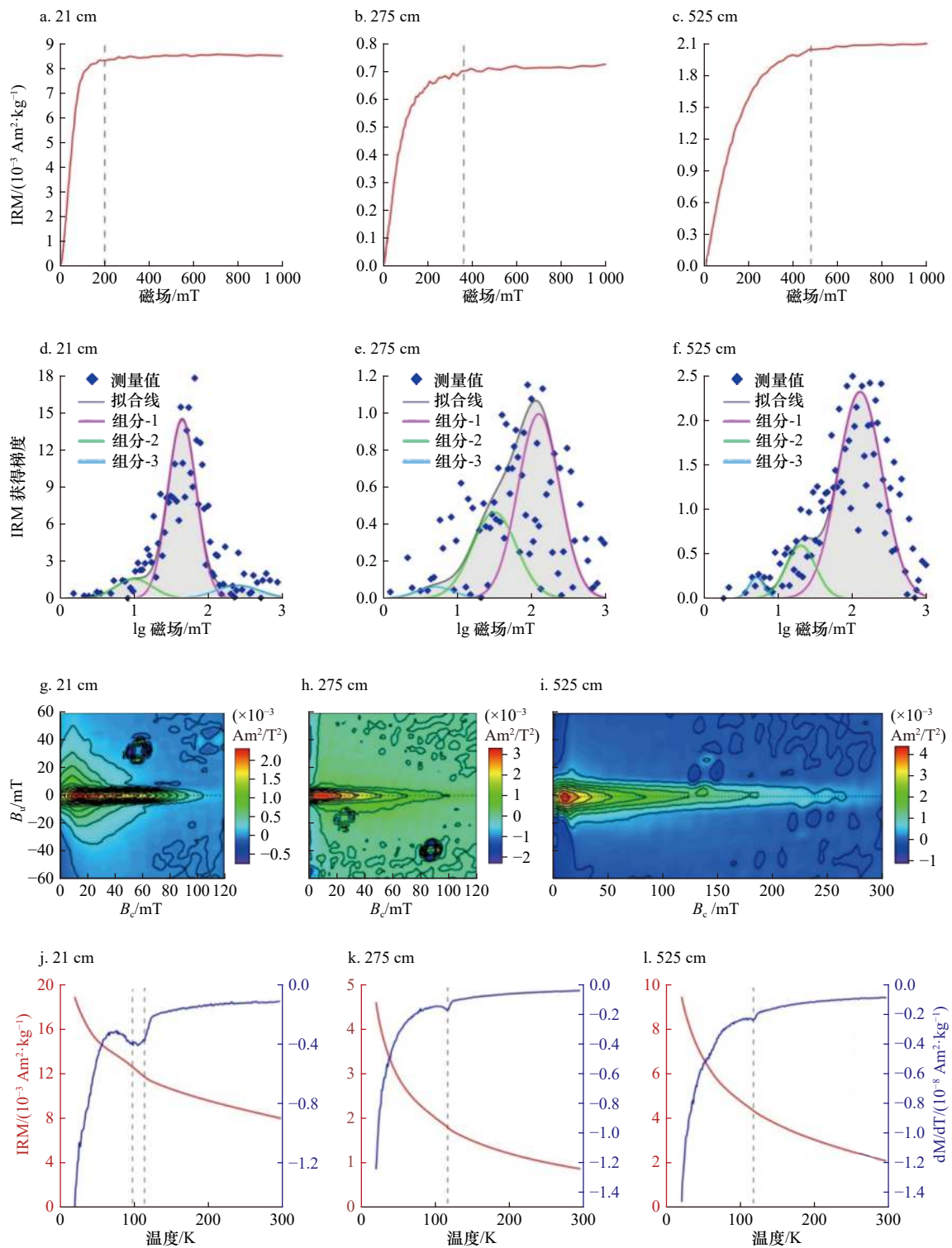


图 4 日本海 LV87-2-3 孔代表性样品的岩石磁学特征

Fig. 4 Rock magnetic properties of representative samples for the sediment Core LV87-2-3 from the Japan Sea

a-c. 等温剩磁 (IRM) 获得曲线; d-f. 基于 IRM 获得曲线的矫顽力谱分解结果; g-i. 一阶反转曲线 (FORC) 图; j-l. 低温磁学曲线 (左侧纵坐标指示 20 K 下施加 2.5 T 场获得的 IRM 随温度的变化, 右侧纵坐标则为 IRM 对温度的一阶导数)

a-c. Isothermal remanent magnetization IRM acquisition curves; d-f. decomposition of coercivity IRM acquisition curves;

g-i. first-order Reversal Curve (FORC) diagrams; j-l. low-temperature magnetic curves (the left vertical coordinate

indicates the variation of IRM with temperature acquired by applying a 2.5 T field at 20 K, while the right vertical

coordinate is the first-order derivative of IRM with respect to temperature)

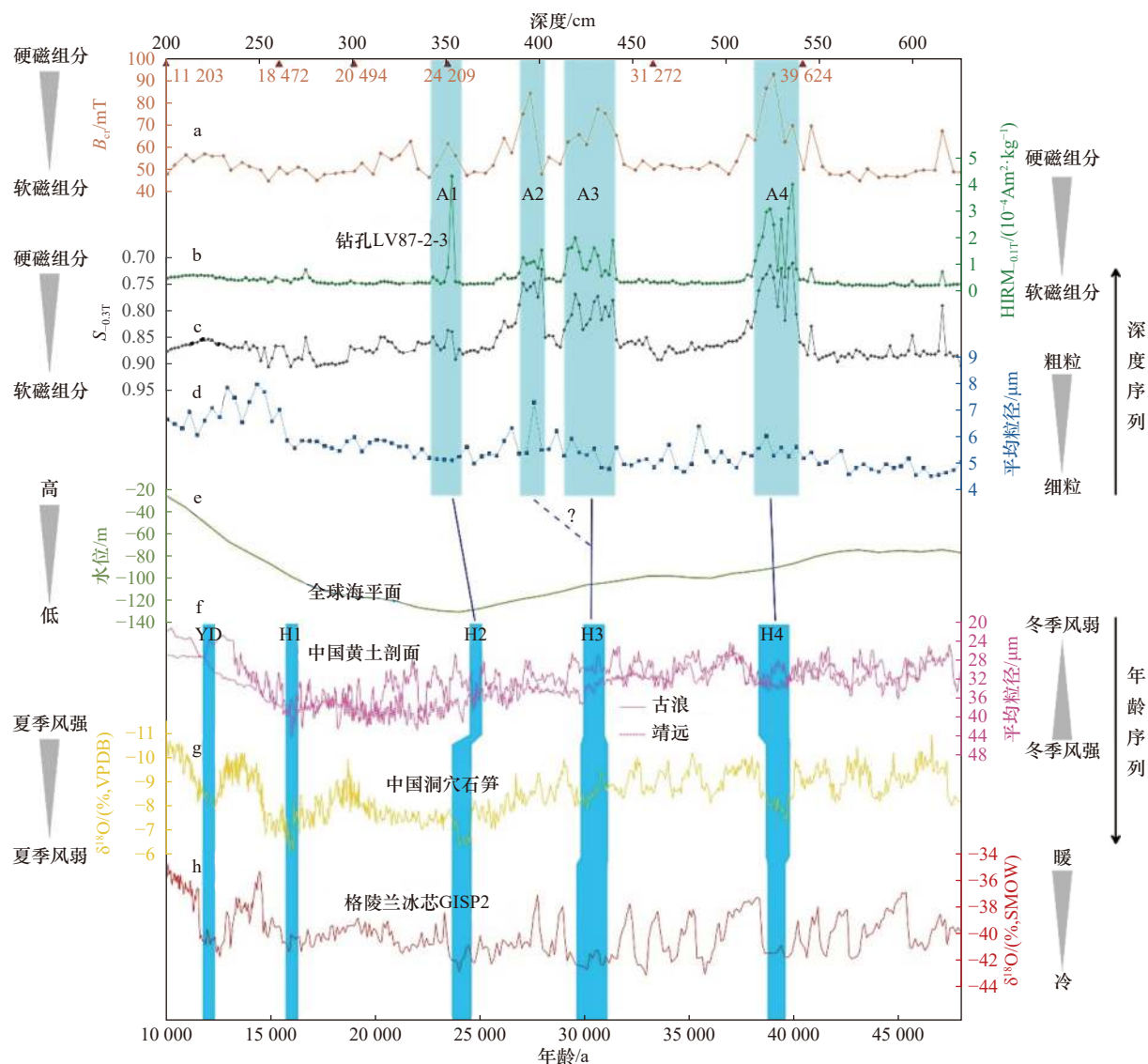


图 5 日本海 LV87-2-3 孔(岩心 200 cm 以下层位)岩石磁学和粒度参数随深度的变化与全球海平面和其他地区已有气候曲线的对比

Fig. 5 The variations of rock magnetic and grain-size parameters along with depth for sediment Core LV87-2-3 (below 200 cm) from the Japan Sea compared with global sea level and reported climate curves in other regions

a-d 依次为 LV87-2-3 孔(岩心 200 cm 以下层位)剩磁矫顽力( $B_{cr}$ )、剩磁矫顽力高于 0.1 T 的矿物含量( $HIRM_{0.1T}$ )、剩磁矫顽力低于 0.3 T 矿物的相对含量( $S_{0.3T}$ )、平均粒径; e-h 依次为全球海平面变化<sup>[70]</sup>、指示东亚冬季风(EAWM)强度的中国黄土平均粒径<sup>[41]</sup>、指示东亚夏季风(EASM)强度的中国石笋氧同位素记录<sup>[71]</sup>、指示 D-O 旋回冰阶-间冰阶波动的格陵兰冰芯(GISP2)的氧同位素曲线<sup>[69]</sup>; 图中浅蓝色竖条带标出的为高矫顽力组分含量相对高的层位, 称作“硬磁异常”层, 而深蓝色条带对应的为新仙女木事件以及前 4 次 Heinrich 事件

a-d are  $B_{cr}$ , the mineral content of  $B_{cr}$  higher than 0.1 T ( $HIRM_{0.1T}$ ), the relative mineral content of  $B_{cr}$  lower than 0.3 T ( $S_{0.3T}$ ) and main grain-size, respectively, for sediment Core LV87-2-3 (below 200 cm); e-h are global sea level change<sup>[70]</sup>, mean grain-size of loess in China<sup>[41]</sup> indicating the intensity of EAWM, oxygen isotope curves from stalagmite records in China<sup>[71]</sup> indicating the intensity of EASM, and GISP2  $\delta^{18}O$  stack<sup>[69]</sup> indicating stadial-interstadial fluctuations of the D-O cycle. The light blue vertical bands in the figure indicate the layers with relatively high content of high coercivity components named “hard magnetic anomalies” layers; while the deep blue vertical bands in the figure correspond the Younger Dryas event and first four Heinrich Events

O 旋回中的冰阶沉积物显示出较明显的生物扰动的亮层, 表明沉积环境的还原性明显减弱<sup>[5, 32-33]</sup>; 作为 D-O 旋回中气温最冷、时间最长的震荡, 北大西洋 Heinrich 事件(下文简称 H 事件)是在北美和格陵兰不稳定冰盖持续扩张情况下, 由气候反馈作用机制触发导致的

冰筏碎屑发生沉积的重要气候事件<sup>[64-66]</sup>。迄今, 较为公认的 H 事件有 6 次(H1~H6), 对应的时代依次分别是 16.8 ka、24.1 ka、30.1 ka、35.9 ka、50 ka 和 66 ka, 每一次的持续时间为 200~2 000 a<sup>[67]</sup>。鉴于研究区较高的沉积速率(图 2e), 相应沉积记录中原生磁性矿

物的硫化还原作用应近似同沉积发生<sup>[27-28, 31]</sup>。因此, 我们暂以 HIRM 值超过背景值(基于峰值前后 5 个连续数据点的平均值计算得到)3 倍以上的至少连续 3 个数据点作为标准, 可以明确本文钻孔中大还原背景下 4 个高矫顽力矿物含量相对高的层位(即图 3 和图 5 中 A1-A4; 为行文方便, 后文一律简称为“硬磁异常”层)对应了末次冰期以来气候相对寒冷阶段的沉积记录, 而最有可能的就是上述 H 事件时期的记录。

根据钻孔已经建立的年龄框架(图 2d, 表 1), 利用线性内插方法可以得到 4 个“硬磁异常”层(A1-A4)的时代依次为: 23.54~24.59 ka、26.52~27.55 ka、28.19~29.86 ka 和 36.91~39.21 ka。通过仔细比对, 发现其与 3 次 H 事件(H2-H4)基本对应, 反映了大还原背景下千-百年尺度气候震荡会削弱水体的还原性。由于 AMS<sup>14</sup>C 测年误差随年龄值增大而升高, 同时考虑到两个测年点间的沉积速率并非绝对均一的客观事实, 部分层位时限的界定难免会存在一定的偏差。具体而言, 除了 A1 和 A4 可相对明确地对应 H2 和 H4 之外, A2 和 A3 的归属仍有一定的多解性。此外, H 事件发生的时间与地理位置和沉积环境也可能存在一定的联系<sup>[68]</sup>。目前, 对于 A2 和 A3 的归属则存在两种方案: 其一仅有 A3 对应 H3, A2 对应紧随其后的冰阶; 其二则是 A2 和 A3 共同对应 H3, 与已有 H3 可能存在多个不连续的峰值冰阶的观点相一致<sup>[68-69]</sup>(图 5h),

即本研究的岩心具有很高的分辨率, 更加有效地捕捉了短尺度气候信号。另外, 部分“硬磁异常”层相对于已知气候事件的持续时间其厚度明显较大(图 3, 图 5), 一方面是日本海冰阶较高的物源输入导致粉尘通量增加<sup>[5]</sup>, 另一方面是受年龄控制点数量所限, 线性内插并不能完全准确限定某一“硬磁异常”层的时限。尽管如此, 目前仍可以肯定的是每一个“硬磁异常”层位都与冷阶密切关联。

## 5.2 “硬磁异常”层位的发生机理探讨

图 6 示意了日本海北部在 Heinrich 时期与 D-O 旋回间冰阶沉积环境条件的对比。在综合考虑了物源、氧化还原环境以及沉积速率对“硬磁异常”层发生的驱动后, 初步认为物源的变化在 H 事件及相邻阶段是微弱的<sup>[72-73]</sup>; 日本海的风尘源区主要是蒙古戈壁-中国东北沙地和塔克拉玛干沙漠<sup>[74]</sup>, 区分二者主导型的关键是平均粒径, 而图 5d 在特定的层位未显示异常。在 D-O 旋回的间冰阶(图 6a), 西风急流和东亚冬季风的衰减致使相对较少的磁性矿物被搬运到日本海<sup>[8]</sup>, 导致该时期的沉积速率相对较低。盛行夏季风不仅为日本海带来丰沛的降水, 也促使东亚河流流量增加, 低盐度东海沿岸流(East China Sea Coastal Water, ECSCW)汇入日本海, 加剧了上层海水的分层现象<sup>[12]</sup>。ECSCW 携带以溶解无机磷(DIP)为主的陆源营养盐<sup>[12]</sup>, 在表层相对充足的太阳辐射下固碳并生

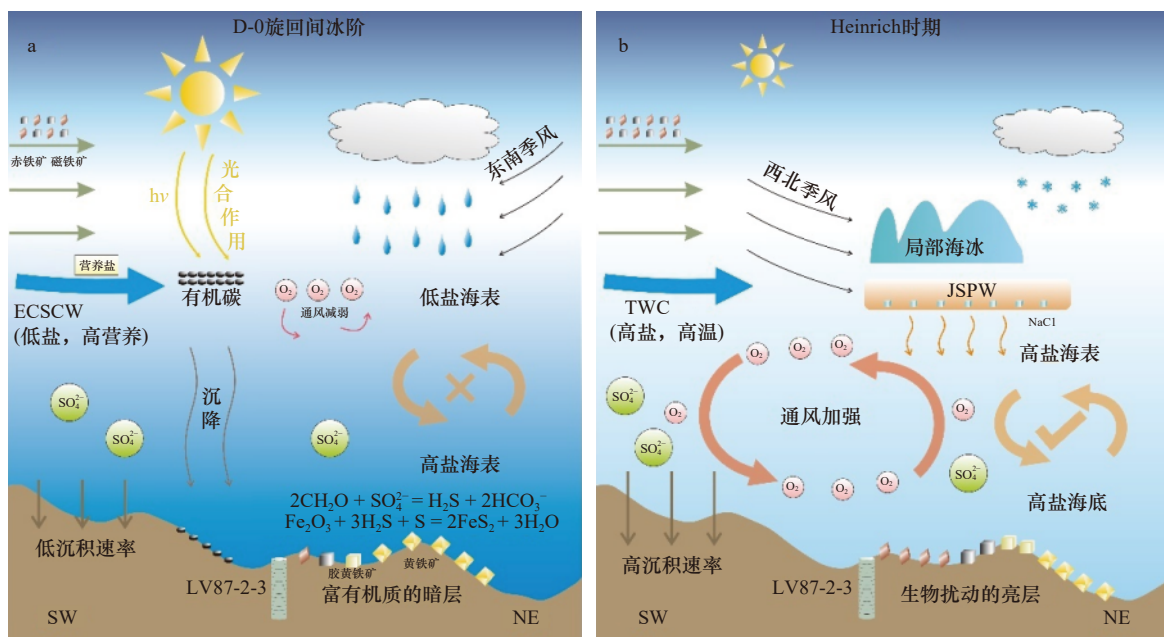


图 6 日本海北部末次冰期以来 D-O 旋回间冰阶(a)与 Heinrich 事件期间(b)不同沉积环境条件下的磁性矿物变化示意图  
Fig. 6 A schematic illustration for the changes of magnetic mineral in different sedimentary environment, which compares interstadials in

D-O cycle (a) with stages of the Heinrich Events (b) since the last glacial in the Japan Sea.

ECSCW: 东海沿岸流; TWC: 对马暖流; JSPW: 日本海底层水

ECSCW: East China Sea Coastal Water; TWC: Tsushima Warm Current; JSPW: Japan Sea Proper Water

成有机质, 生产力提高<sup>[16]</sup>, 有机质颗粒进入水体中还原掉海水中部分硫酸盐( $\text{SO}_4^{2-}$ )。该反应所生成的足量硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$  或  $\text{HS}^-$ )会进一步还原沉积物中的陆源碎屑铁氧化物(即磁铁矿和赤铁矿等)而产生黄铁矿( $\text{FeS}_2$ )及少量的中间产物胶黄铁矿( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ )<sup>[75-76]</sup>, 即磁性矿物的硫化还原作用进行得较为彻底。随着富营养物质的不断供应, 原生铁磁性矿物的溶解持续进行, 因此该时期铁元素的赋存形式主要是黄铁矿( $\text{FeS}_2$ )<sup>[77]</sup>。由于黄铁矿是典型的顺磁性矿物, 不携带剩磁, 所以 SIRM 和  $\chi$  等磁学参数在该时期显示为极低值(图 3a, 图 3c)<sup>[76]</sup>。相反, 在 Heinrich 事件(特别是 H3 和 H4)期间(图 6b), EASM 减弱导致东亚的河流流量大幅度降低<sup>[12]</sup>, 注入日本海的 ECSCW 相对于间冰阶大大减少, 高盐度的 TWC 注入量相对升高。冬季强烈的西北季风会导致亚洲风尘源区处于大规模干旱状态, 不仅导致地面扬沙被卷入对流层而提高了粉尘通量<sup>[5]</sup>, 而且还可能致使亚洲东部的部分河流枯竭, 日本海的营养盐来源减少<sup>[12]</sup>。此外, 本文钻孔位于俄罗斯日本海沿岸 JSPW 以及季节性海冰影响地带, 盐析作用导致表层富氧海水变重下沉<sup>[78]</sup>, 底水氧含量增高<sup>[8, 79]</sup>。在发生微生物硫酸盐还原的反应中<sup>[80]</sup>, 硫化氢的生成量不足以反应掉大部分原生磁性矿物, 尤其是相对更抗还原溶解的赤铁矿和大颗粒磁铁矿<sup>[59]</sup>, 并且还可能会在黄铁矿的表面生成一部分的胶黄铁矿<sup>[81]</sup>。除此之外, 由于异常层位较高的沉积速率限制, 铁氧化物在短暂的沉积过程中可能难以彻底地被还原为最终产物黄铁矿<sup>[76]</sup>, 而是停留在高活性中间产物胶黄铁矿阶段, 也是导致该层位剩磁含量异常的原因<sup>[82]</sup>。值得关注的是, 虽然海平面的下降会通过扩大源区面积、减少风尘输入距离使粉尘通量增加<sup>[83]</sup>, 但该影响主要作用在冰期-间冰期尺度, 由 H 事件及相邻阶段的短期海平面波动导致的大气粉尘浓度在日本海上空并无明显的变化<sup>[84]</sup>。因此, 以 H 事件为典型的 D-O 旋回的冰阶, 日本海还原环境受到削减, 以及高沉积速率下磁性矿物输入相对提高、硫化还原反应难以充分进行, 具体到相应的沉积记录中则体现为末次冰期大还原背景下千-百年尺度的磁性增强(即图 3 和图 5 中的“硬磁异常”层)。

此外, 相对于 H2-H4 事件的信号在本文钻孔中的明显记录, 同样作为末次冰期典型冷事件的 H1 和新仙女木(Younger Dryas, YD, 12.9~11.5 ka BP)事件却未被很好地记录, 暗示了日本海北部在相应时期相对较弱的通风环境。我们推测在 EAWM 作用下, H1 和 YD 时期的 ECSCW 的贡献很可能有所提升。

上文已有所提及, 北大西洋冰消期千年尺度气候事件和东亚的气候具有强烈的遥相关关系<sup>[79, 85]</sup>: 在纬向上, AMOC 的减弱导致北半球纬向的热传送不能有效地发生, 热带辐合带南移<sup>[41]</sup>; 经向上, 其活动也会导致陆海温度梯度的形成, 从而加强中纬西风, 使得沿青藏高原斜坡的对流增强<sup>[86]</sup>。另外, 由于 H1 和 YD 时期 AMOC 的减弱导致赤道到北极的温度梯度增加, 西风急流轴季节性南移, 从而使得青藏高原背风面对流增强和水汽抬升<sup>[72, 85]</sup>; 此时, 在西风急流和 EASM 锋面在东亚降水中的主导作用下, H1 和 YD 时期中国的降水呈现南多北少的情况<sup>[85]</sup>。因此, 在 H1 和 YD 时期底水还原性增强, 很有可能是因为 AOMC 的减弱导致纬向气压差引起的“急流转变”<sup>[81]</sup>, 致使 ECSCW 经由对马海峡对日本海的注入量提高从而减弱了日本海的垂直交换。最新研究表明, AMOC 的强减弱也会阻碍末次冰消期北太平洋降温信号在东亚的传播, 而由轨道和温室气体控制的夏季增温主导了 H1 期间东亚地区的温度变化, 间接地减少了输入日本海的粉尘, 也可能是 H1 信号在本文钻孔中记录不明显的原因之一<sup>[87]</sup>。另外, 由于 LGM 时期海平面基本下降到日本海对马海峡的基台高度(130 m)(图 5e)<sup>[2]</sup>, 日本海几乎完全封闭, 加之西风急流轴停滞在青藏高原南部以及洋流活动的减弱<sup>[74, 88]</sup>, 日本海沉积物供应减少且粒径较细(图 5d)<sup>[8]</sup>, 因此没有出现“硬磁异常”层信号。值得注意的是, 在没有外部原因胁迫的海气耦合强盛时期, 日本海具有较强的内部洋流活动, 这也有望成为影响日本海局部沉积环境还原性变化的原因之一<sup>[89-90]</sup>。

## 6 结论

本文通过对取自日本海北部长度为 626 cm 的 LV87-2-3 孔岩心(48.3 ka BP)开展系统的岩石磁学测试分析, 并结合 AMS<sup>14</sup>C 测年和粒度分析, 获得以下认识: (1) 上部 0~55 cm 层位中的原生磁性矿物未受明显还原改造, 主要为细粒磁铁矿, 另含少量赤铁矿和粗粒磁铁矿, 55 cm 以下层位的磁性组分则被强烈还原而形成黄铁矿, 导致磁性极大减弱; (2) 岩心 55 cm 以下整体磁性极弱背景下的相对强磁性层位中的高矫顽力矿物占比明显升高, 指示了相对较弱的还原条件, 系对 Heinrich 事件的有效记录; (3) 在 D-O 旋回的间冰阶, 大量低盐高营养的 ECSCW 进入研究区, 不仅加强了水体垂直分层, 而且提升了表层生产力, 进而加剧了原生磁性矿物的硫化还原; (4) 在 Heinrich 事件期间, EAWM 的加强以及高盐度 TWC 的注入则

增强了水体通风,在一定程度上抑制了硫化还原作用,加之沉积速率升高,从而使得部分原生磁性矿物尤其是相对更抗还原的高矫顽力矿物得以保留;(5)磁

学参数对于日本海千-百年尺度上的古环境与古海洋演化仍具有重要的指示意义,在今后的相关研究中应予以重视。

#### 参考文献:

- [1] Chen Jun, Li Gaojun, Yang Jiedong, et al. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: implications for the provenances of Asian dust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(15): 3904–3914.
- [2] Minoura K, Akaki K, Nemoto N, et al. Origin of deep water in the Japan Sea over the last 145 kyr[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 339–341: 25–38.
- [3] Shen Xingyan, Wan Shiming, France-Lanord C, et al. History of Asian eolian input to the Sea of Japan since 15 Ma: links to Tibetan uplift or global cooling?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 474: 296–308.
- [4] Tada R, Irino T, Koizumi I. Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in Late Quaternary sediments of the Japan Sea[J]. *Paleoceanography*, 1999, 14(2): 236–247.
- [5] 沈兴艳, 万世明. 日本海第四纪沉积记录及其海陆联系的研究进展 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 139–151.  
Shen Xingyan, Wan Shiming. Research progress of Quaternary depositional records of the Japan Sea and its implications for the linkages to the Asian continent[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 139–151.
- [6] Wang Pinxian. Response of western Pacific marginal seas to glacial cycles: paleoceanographic and sedimentological features[J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1/4): 5–39.
- [7] Bailey I, Liu Qingsong, Swann G E A, et al. Iron fertilisation and biogeochemical cycles in the sub-Arctic northwest Pacific during the late Pliocene intensification of northern hemisphere glaciation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 307(3/4): 253–265.
- [8] 董智, 石学法, 葛晨东, 等. 日本海中部 60 ka 以来的风尘沉积对西风环流演化的指示 [J]. *科学通报*, 2017, 62(11): 1172–1184.  
Dong Zhi, Shi Xuefa, Ge Chendong, et al. Evolution of westerly jet during the last 60 ka: evidence from core deposits in the central Japan (East) Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(11): 1172–1184.
- [9] Zhang Qiang, Liu Qingsong, Li Jinhua, 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.
- [10] Itaki T, Ikehara K, Motoyama I, et al. Abrupt ventilation changes in the Japan Sea over the last 30 ky: evidence from deep-dwelling radiolarians[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 208(3/4): 263–278.
- [11] 豆汝席, 邹建军, 石学法, 等. 3 万年以来日本海西部海冰活动变化 [J]. *第四纪研究*, 2020, 40(3): 690–703.  
Dou Ruxi, Zou Jianjun, Shi Xuefa, et al. Reconstructed changes in sea ice in the western Sea of Japan over the last 30000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(3): 690–703.
- [12] Tada R. Onset and evolution of millennial-scale variability in the Asian Monsoon and its impact on paleoceanography of the Japan Sea[M]//Clift P, Kuhnt W, Wang P, et al. *Continent-Ocean Interactions Within East Asian Marginal Sea*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2004, 149: 283–298.
- [13] Fujine K, Tada R, Yamamoto M. Paleotemperature response to monsoon activity in the Japan Sea during the last 160 kyr[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280(3/4): 350–360.
- [14] Lee K E, Bahk J J, Choi J. Alkenone temperature estimates for the East Sea during the last 190, 000 years[J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39(6): 741–753.
- [15] Ikehara K, Fujine K. Fluctuations in the late Quaternary East Asian winter monsoon recorded in sediment records of surface water cooling in the northern Japan Sea[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(9): 866–872.
- [16] Zou Jianjun, Shi Xuefa, Liu Yanguang, et al. Reconstruction of environmental changes using a multi-proxy approach in the Ulleung Basin (Sea of Japan) over the last 48 ka[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(9): 891–900.
- [17] Tada R, Irino T, Ikehara K, et al. High-resolution and high-precision correlation of dark and light layers in the Quaternary hemipelagic sediments of the Japan Sea recovered during IODP Expedition 346[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5: 19.
- [18] Wu Yonghua, Shi Xuefa, Gong Xun, et al. Evolution of the upper ocean stratification in the Japan Sea since the last glacial[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(16): e2020GL088255.
- [19] Yamazaki T, Abdeldayem A L, Ikehara K. Rock-magnetic changes with reduction diagenesis in Japan Sea sediments and preservation of geomagnetic secular variation in inclination during the last 30, 000 years[J]. *Earth, Planets and Space*, 2003, 55(6): 327–340.
- [20] Verosub K L, Roberts A P. Environmental magnetism: past, present, and future[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B2): 2175–2192.
- [21] 胡守云, 邓成龙, Appel E, 等. 湖泊沉积物磁学性质的环境意义 [J]. *科学通报*, 2001, 46(17): 1491–1494.  
Hu Shouyun, Deng Chenglong, Appel E, et al. Environmental magnetic studies of lacustrine sediments[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(7): 1491–1494.
- [22] 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 中国黄土环境磁学 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2): 193–209.

- Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin, et al. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 193–209.
- [23] Liu Qingsong, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: principles and applications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): RG4002.
- [24] Zheng Y, Kissel C, Zheng H B, et al. Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: magnetic properties, diagenesis and paleoclimate implications[J]. *Marine Geology*, 2010, 268(1/4): 34–42.
- [25] Liu Jianxing, Liu Qingsong, Zhang Xunhua, et al. Magnetostratigraphy of a long Quaternary sediment core in the South Yellow Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 144: 1–15.
- [26] Qin Huafeng, Zhao Xiang, Liu Shuangchi, et al. An ultra-low magnetic field thermal demagnetizer for high-precision paleomagnetism[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72(1): 170.
- [27] Bowles M W, Mogollón J M, Kasten S, et al. Global rates of marine sulfate reduction and implications for sub-sea-floor metabolic activities[J]. *Science*, 2014, 344(6186): 889–891.
- [28] Rickard D. How long does it take a pyrite framboid to form?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 513: 64–68.
- [29] Chang Liao, Roberts A P, Winklhofer M, et al. Magnetic detection and characterization of biogenic magnetic minerals: a comparison of ferromagnetic resonance and first-order reversal curve diagrams[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(8): 6136–6158.
- [30] Liu Jianxing, Shi Xuefa, Liu Qingsong, et al. Authigenic iron sulfides indicate sea-level change on the continental shelf: an illustration from the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(3): e2020JB021222.
- [31] Yu Xiaoxiao, Mei Xi, Liu Jiarui, et al. Multiple sulfur isotopes of iron sulfides from thick greigite-bearing sediments indicate anaerobic oxidation and possible leakages of coastal methane[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(16): e2023GL103303.
- [32] Tada R. Paleooceanographic evolution of the Japan Sea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 108(3/4): 487–508.
- [33] Oba T, Irino T. Sea level at the last glacial maximum, constrained by oxygen isotopic curves of planktonic foraminifera in the Japan Sea[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(9): 941–947.
- [34] 邹建军, 宗娴, 朱爱美, 等. 37 ka 以来日本海沉积物有机质碳和氮稳定同位素变化及其古海洋学意义 [J]. *地学前缘*, 2022, 29(4): 123–135.
- Zou Jianjun, Zong Xian, Zhu Aimei, et al. Stable carbon and nitrogen isotope variations in sedimentary organic matter in the Sea of Japan since 37 ka: paleooceanographic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(4): 123–135.
- [35] Takei T, Minoura K, Tsukawaki S, et al. Intrusion of a branch of the Oyashio Current into the Japan Sea during the Holocene[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 11-1–11-10.
- [36] Domitsu H, Oda M. Linkages between surface and deep circulations in the southern Japan Sea during the last 27, 000 years: evidence from planktic foraminiferal assemblages and stable isotope records[J]. *Marine Micropaleontology*, 2006, 61(4): 155–170.
- [37] Kido Y, Minami I, Tada R, et al. Orbital-scale stratigraphy and high-resolution analysis of biogenic components and deep-water oxygenation conditions in the Japan Sea during the last 640 kyr[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 247(1/2): 32–49.
- [38] Nagashima K, Tada R, Tani A, et al. Contribution of aeolian dust in Japan Sea sediments estimated from ESR signal intensity and crystallinity of quartz[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(2): Q02Q04.
- [39] Peterson L C, Haug G H, Hughen K A, et al. Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the last glacial[J]. *Science*, 2000, 290(5498): 1947–1951.
- [40] Voelker A H L. Global distribution of centennial-scale records for Marine Isotope Stage (MIS) 3: a database[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(10): 1185–1212.
- [41] Sun Youbin, Clemens S C, Morrill C, et al. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(1): 46–49.
- [42] Xu Zhiwei, Lu Huayu, Yi Shuangwen, et al. Climate-driven changes to dune activity during the Last Glacial Maximum and deglaciation in the Mu Us dune field, north-central China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 427: 149–159.
- [43] Shi Zhengguo, Liu Xiaodong. Distinguishing the provenance of fine-grained eolian dust over the Chinese Loess Plateau from a modeling perspective[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2011, 63(5): 959–970.
- [44] Xie Yuanyun, Chi Yunping. Geochemical investigation of dry- and wet-deposited dust during the same dust-storm event in Harbin, China: constraint on provenance and implications for formation of aeolian loess[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 120: 43–61.
- [45] Ikehara K, Itaki T. Millennial-scale fluctuations in seasonal sea-ice and deep-water formation in the Japan Sea during the late Quaternary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 247(1/2): 131–143.
- [46] Heaton T J, Köhler P, Butzin M, et al. Marine20—The marine radiocarbon age calibration curve (0–55,000 cal BP)[J]. *Radiocarbon*, 2020, 62(4): 779–820.
- [47] Kuzmin Y V, Burr G S, Gorbunov S V, et al. A tale of two seas: reservoir age correction values (R,  $\Delta R$ ) for the Sakhalin Island (Sea of Japan and Okhotsk Sea)[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 259(1): 460–462.
- [48] Bloemendal J, King J W, Hall F R, et al. Rock magnetism of Late Neogene and Pleistocene deep-sea sediments: relationship to sediment

- source, diagenetic processes, and sediment lithology[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1992, 97(B4): 4361–4375.
- [49] Harrison R J, Feinberg J M. FORCinel: an improved algorithm for calculating first-order reversal curve distributions using locally weighted regression smoothing[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(5): Q05016.
- [50] Pike C, Fernandez A. An investigation of magnetic reversal in submicron-scale Co dots using first order reversal curve diagrams[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(9): 6668–6676.
- [51] Heslop D, Dekkers M J, Kruiver P P, et al. Analysis of isothermal remanent magnetization acquisition curves using the expectation-maximization algorithm[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(1): 58–64.
- [52] Pigati J S, Quade J, Wilson J, et al. Development of low-background vacuum extraction and graphitization systems for  $^{14}\text{C}$  dating of old (40–60ka) samples[J]. *Quaternary International*, 2007, 166(1): 4–14.
- [53] 刘健, 张欣, 丁璇, 等. 江苏南通近岸区晚第四纪沉积序列的沉积相特征与定年 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(3): 35–48.  
Liu Jian, Zhang Xin, Ding Xuan, et al. Sedimentary facies characteristics and dating of the late Quaternary sedimentary sequence in the nearshore coastal area of Nantong, Jiangsu Province, China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(3): 35–48.
- [54] Rowan C J, Roberts A P, Broadbent T. Reductive diagenesis, magnetite dissolution, greigite growth and paleomagnetic smoothing in marine sediments: a new view[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(1/2): 223–235.
- [55] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义 [J]. *地质论评*, 2009, 55(1): 91–99.  
Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, et al. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies[J]. *Geological Review*, 2009, 55(1): 91–99.
- [56] 吕荐阔, 翟世奎, 于增慧, 等. 氧化还原敏感性元素在沉积环境判别中的应用研究进展 [J]. *海洋科学*, 2021, 45(12): 108–124.  
Lü Jiankuo, Zhái Shikuí, Yú Zènghuì, et al. Application and influence factors of redox-sensitive elements in a sedimentary environment[J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(12): 108–124.
- [57] Roberts A P, Heslop D, Zhao Xiang, et al. Understanding fine magnetic particle systems through use of first-order reversal curve diagrams[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(4): 557–602.
- [58] 秦华峰, 刘青松, 潘永信. 一阶反转曲线 (FORC) 图的原理及应用实例 [J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 743–751.  
Qin Huafeng, Liu Qingsong, Pan Yongxin. The first-order reversal curve (FORC) diagram: theory and case study[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 743–751.
- [59] Liu Jian, Zhu Rixiang, Roberts A P, et al. High-resolution analysis of early diagenetic effects on magnetic minerals in post-middle-Holocene continental shelf sediments from the Korea Strait[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B3): B03103.
- [60] Verwey E J W. Electronic conduction of magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) and its transition point at low temperatures[J]. *Nature*, 1939, 144(3642): 327–328.
- [61] Chang Liao, Heslop D, Roberts A P, et al. Discrimination of biogenic and detrital magnetite through a double Verwey transition temperature[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(1): 3–14.
- [62] Yamazaki T, Suzuki Y, Kouduka M, et al. Dependence of bacterial magnetosome morphology on chemical conditions in deep-sea sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 513: 135–143.
- [63] Irino T, Tada R. Quantification of aeolian dust (Kosa) contribution to the Japan Sea sediments and its variation during the last 200 ky[J]. *Geochemical Journal*, 2000, 34(1): 59–93.
- [64] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130, 000 years[J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(2): 142–152.
- [65] Rasmussen T L, van Weering T C E, Labeyrie L. High resolution stratigraphy of the Faeroe-Shetland Channel and its relation to north Atlantic paleoceanography: The last 87 kyr[J]. *Marine Geology*, 1996, 131(1/2): 75–88.
- [66] 刘景昱, 方念乔. 海因里希事件与类海因里希事件 [J]. *地球科学进展*, 2019, 34(6): 618–628.  
Liu Jingyu, Fang Nianqiao. Heinrich events and Heinrich (-like) events[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(6): 618–628.
- [67] Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates[J]. *Science*, 1997, 278(5341): 1257–1266.
- [68] Rohling E J, Mayewski P A, Challenor P. On the timing and mechanism of millennial-scale climate variability during the last glacial cycle[J]. *Climate Dynamics*, 2003, 20(2/3): 257–267.
- [69] Stuiver M, Grootes P M. GISP2 oxygen isotope ratios[J]. *Quaternary Research*, 2000, 53(3): 277–284.
- [70] Spratt R M, Lisiecki L E. A Late Pleistocene sea level stack[J]. *Climate of the Past*, 2016, 12(4): 1079–1092.
- [71] Cheng Hai, Edwards R L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534(7609): 640–646.
- [72] Cacho I, Grimalt J O, Sierro F J, et al. Evidence for enhanced Mediterranean thermohaline circulation during rapid climatic coolings[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 183(3/4): 417–429.
- [73] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2345–2348.
- [74] Nagashima K, Tada R, Tani A, et al. Millennial-scale oscillations of the westerly jet path during the last glacial period[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(6): 1214–1220.

- [75] Schoonen M A A, Barnes H L. Reactions forming pyrite and marcasite from solution: II. Via FeS precursors below 100°C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(6): 1505–1514.
- [76] Roberts A P. Magnetic mineral diagenesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 151: 1–47.
- [77] Berner R A. Sedimentary pyrite formation: an update[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(4): 605–615.
- [78] Tanaka K. Formation of bottom water and its variability in the northwestern part of the Sea of Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(3): 2081–2094.
- [79] 石学法, 邹建军, 姚政权, 等. 日本海末次冰期以来沉积作用和环境演化及其控制要素 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 1–11.  
Shi Xuefa, Zou Jianjun, Yao Zhengquan, et al. Sedimentation and environment evolution of the Sea of Japan since the Last Glaciation and its driving forces[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(3): 1–11.
- [80] 刘喜婷, 李安春, 马志鑫, 等. 沉积过程对自生黄铁矿硫同位素的约束 [J]. *沉积学报*, 2020, 38(1): 124–137.  
Liu Xiting, Li Anchun, Ma Zhixin, et al. Constraint of sedimentary processes on the sulfur isotope of authigenic pyrite[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(1): 124–137.
- [81] Chiang J C H, Fung I Y, Wu Chihua, et al. Role of seasonal transitions and westerly jets in East Asian paleoclimate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 108: 111–129.
- [82] Wang Yi, Hendy I L, Latimer J C, et al. Diagenesis and iron paleo-redox proxies: new perspectives from magnetic and iron speciation analyses in the Santa Barbara Basin[J]. *Chemical Geology*, 2019, 519: 95–109.
- [83] Ono Y, Naruse T. Snowline elevation and eolian dust flux in the Japanese islands during isotope stages 2 and 4[J]. *Quaternary International*, 1997, 37: 45–54.
- [84] Irino T, Tada R. High-resolution reconstruction of variation in aeolian dust (Kosa) deposition at ODP site 797, the Japan Sea, during the last 200 ka[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 35(1/2): 143–156.
- [85] Zhang Hongbin, Griffiths M L, Chiang J C H, et al. East Asian hydroclimate modulated by the position of the westerlies during Termination I[J]. *Science*, 2018, 362(6414): 580–583.
- [86] Kubota Y, Kimoto K, Tada R, et al. Millennial-scale variability of East Asian summer monsoon inferred from sea surface salinity in the northern East China Sea (ECS) and its impact on the Japan Sea during Marine Isotope Stage (MIS) 3[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, 6: 39.
- [87] Zhu Zeyang, Wu Jing, Chu Guoqiang, et al. Summer warming during Heinrich Stadial 1 in Northeast China[J]. *Geology*, 2024, 52(6): 385–389.
- [88] Shi X F, Wu Y H, Zou J J, et al. Multiproxy reconstruction for Kuroshio responses to northern hemispheric oceanic climate and the Asian Monsoon since Marine Isotope Stage 5.1 (~ 88 ka)[J]. *Climate of the Past*, 2014, 10(5): 1735–1750.
- [89] Deser C, Phillips A, Bourdette V, et al. Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(3/4): 527–546.
- [90] Ueda H, Kamae Y, Hayasaki M, et al. Combined effects of recent Pacific cooling and Indian Ocean warming on the Asian monsoon[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8854.

## Magnetic recordings of millennium-scale climate events in the northern Japan Sea since the early MIS 3

Zou Qingchao<sup>1</sup>, Shi Xuefa<sup>1,2</sup>, Ge Shulan<sup>1,2</sup>, Wu Yonghua<sup>1,2</sup>, Zou Jianjun<sup>1,2</sup>, He Xiangfeng<sup>3</sup>,  
Sergey A. Gorbarenko<sup>4</sup>, Liu Jianxing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Laboratory of Marine Geology, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China; 3. School of Geography and Marine Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Institute of Pacific Ocean Research, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok 690041, Russia)

**Abstract:** The Japan Sea is the largest marginal sea in the northwestern Pacific Ocean. For a long time, it has been widely believed that the sediments are deposited in strongly reducing environment, which results in extremely weak magnetic signals and then restricts the application of frequently-used magnetic method in this region. To investigate deeply the availability of magnetic indicators in paleoenvironmental and paleoceanographic studies in the Japan Sea, we conducted systematic rock magnetic analyses, high-resolution accelerator mass spectrometer (AMS) <sup>14</sup>C

dating, and grain-size analysis on a 626-cm-long sediment core (LV87-2-3, water depth 740 m) recovered from the northern Japan Sea that has been studied in relatively low level. The results indicate that the studied core corresponds to a sedimentary record since approximately 48.3 ka BP. The majority of primary ferrimagnetic minerals, mainly magnetite, in the sediments below 55 cm, had been reduced into pyrite, which caused weakly magnetic intensity. This is associated closely with the intensified stratification of water body and the increase in surface productivity during interstadials in the Dansgaard-Oeschger (D-O) cycles. Nevertheless, there are still four strong magnetic layers characterized by elevated percentages of high-coercivity minerals (i.e., hematite and goethite), which are termed as 'hard-magnetic abnormal' layers and correspond well with the Heinrich Events. This indicates relatively weak reducing conditions that were resulted from the enhanced East Asian Winter Monsoon (EAWM) and injection of high salinity Tsushima Warm Current (TWC). These changes, however, are not reflected by the grain-size of sediment. Our study therefore not only indicates that the role of magnetic parameters in the paleoenvironmental and palaeoceanographic reconstructions of the Japan Sea during the last glacial, but also provides new perspectives and ideas for relevant investigations in the future.

**Key words:** sediments of the Japan Sea; magnetic minerals; rock magnetism; paleoenvironment; the Heinrich Events