



黄河下游湖泊沉积物的磁性特征及指示的物源信息与环境变化

张蕊, 陈诗越, 邢力, 陈影影

Provenance and environmental evolution indicated by magnetic characteristics of lake sediments in the lower Yellow River

ZHANG Rui, CHEN Shiyue, XING Li, and CHEN Yingying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024060301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河下游大野泽沉积物粒度特征及其对环境演化的指示

Grain-size characteristics of Dayeze lake sediments in the lower reach of Yellow River and their environmental implications

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(3): 151-161

钱塘江中下游沉积物磁性特征及其对沉积动力环境的指示意义

Magnetic properties of sediments and their implications for sedimentary dynamic environment in the middle and lower reaches of the Qiantang River

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 181-191

南海西北部16 kaBP以来沉积物的环境磁学特征及其物源指示意义

Environmental magnetic characteristics and provenance significance of sediments in NW South China Sea since the past 16 ka

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(1): 13-26

长江与黄河黏土粒级沉积物地球化学特征及其物源指示意义

Geochemical characteristics of clay-sized sediments of the Yangtze and Yellow Rivers and their implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 109-118

黄河下游东平湖炭屑记录的近1 500年以来火演化历史

Fire history over the past 1 500 years revealed by charcoal record from the Dongping Lake in the Lower Yellow River

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 33-45

东海东北部陆架表层沉积物碎屑矿物分布及其物源分析

Distribution and provenance of detrital minerals in surface sediments of the northeastern East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 58-69



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张蕊, 陈诗越, 邢力, 等. 黄河下游湖泊沉积物的磁性特征及指示的物源信息与环境变化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 161-175.
ZHANG Rui, CHEN Shiyue, XING Li, et al. Provenance and environmental evolution indicated by magnetic characteristics of lake sediments in the lower Yellow River[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 161-175.

黄河下游湖泊沉积物的磁性特征及指示的物源信息与环境变化

张蕊¹, 陈诗越¹, 邢力², 陈影影¹

1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116
2. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

摘要: 湖泊沉积物是记录黄河决溢、改道和沉积环境变化的重要地质载体。由于以往研究很难有效区分出黄河物质以及区域内其他物质的信息, 导致对黄河下游湖泊物源解析和沉积过程探讨不精准, 影响了对下游黄河变迁和沉积环境演化的认知。本文基于黄河下游现代沉积物及湖泊钻孔磁性矿物特征研究, 探析大野泽钻孔洪泛沉积物潜在物源和黄墩洼地钻孔沉积物记录的重要沉积过程, 提取相关黄河下游河道和沉积环境变化信息。基于磁性矿物类型、粒径和组分差异, 识别出大野泽钻孔洪泛沉积物主要物源为黄河泥沙, 证实了磁性矿物特征分析在物源识别中的有效性并可以用来探究湖泊沉积过程。进一步通过高分辨率的环境磁学指标与粒度、总有机碳 (TOC) 等环境代用指标的综合分析, 揭示苏北黄墩洼地沉积环境发生了重要转变。黄墩洼地自早/中全新世 (约 9712 aBP) 以来经历了截然不同的沉积过程, 即由接收陆源碎屑沉积到逐渐转化为河流洪泛物质沉积。两种沉积环境转变大致出现在 4201 aBP, 暗示了黄河最早影响苏北黄墩地区的时间。以上基于磁性矿物特征的物源分析和沉积环境变化探讨, 为深入理解黄河下游的变迁规律及其与湖泊的相互关系提供了重要科学参考。

关键词: 磁性矿物; 物源; 沉积环境; 黄河下游湖泊; 大野泽; 黄墩洼地

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024060301

Provenance and environmental evolution indicated by magnetic characteristics of lake sediments in the lower Yellow River

ZHANG Rui¹, CHEN Shiyue¹, XING Li², CHEN Yingying¹

1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China
2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Lake sediments in the Yellow River reaches are important geological carriers that record the overflow, diversion, and sedimentary environment changes of the river. Previously, it was difficult to effectively distinguish the Yellow-River-sourced materials from those from other sources in the region, our knowledge of provenance and sedimentation in the lakes in the lower Yellow River reaches were inaccurate, which affected the comprehension of the changes in the lower Yellow River and the evolution of the sedimentary environment. The magnetic mineral characteristics of modern sediments and lake boreholes in the lower reaches of the Yellow River were studied. The sources of floodplain sediments in the Dayeze Lake borehole and the major sedimentary processes recorded in the Huangdun Depression borehole sediments in the northern Jiangsu were analyzed, from which key information of changes in river channel and sedimentary environment of the lower Yellow River reaches was extracted. Based on the differences in magnetic mineral types, particle sizes, and components, the main source of flood sediments in the Dayeze Lake borehole was identified as Yellow River silt, which confirms the effectiveness of magnetic mineral characteristic analysis in source identification and can be used to explore lake sedimentary processes. Furthermore, through the comprehensive analysis of high-resolution environmental magnetic indicators and environmental proxy indicators such as particle size and total organic carbon (TOC), it was revealed that since the early/middle Holocene (~9712 aBP), the sedimentary environment in the Huangdun Depression underwent very

资助项目: 国家自然科学基金项目“中晚全新世黄河下游湖泊沉积物磁性特征及河道变迁”(41907370), “历史时期黄河下游湖泊消亡过程与机制及沉积碳埋藏量估算”(41871073), “东平湖沉积物物源示踪及黄河洪水事件判识”(41701101); 江苏师范大学科研创新项目(9212618101)

作者简介: 张蕊 (1987—), 女, 博士, 讲师, 主要从事第四纪沉积环境和晚新生代东亚季风演化研究, E-mail: ruizhang@jsnu.edu.cn

通讯作者: 陈诗越 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事湖泊沉积与环境演变研究, E-mail: chenshiyue@jsnu.edu.cn

收稿日期: 2024-06-03; **改回日期:** 2024-07-25. 文凤英编辑

different sedimentation processes and the major transition from lacustrine terrigenous clastic facies to river flood facies took place at ~ 4201 aBP, indicating the earliest time when the Yellow River affected the Huangdun area in the northern Jiangsu. The above provenance analysis based on magnetic mineral characteristics and the discussion on sedimentary environment changes provide important scientific references for a deeper understanding of the changes in the lower reaches of the Yellow River and its relationship with lakes.

Key words: magnetic minerals; sediment source; depositional environment; lakes in the Lower Yellow River; Dayeze Lake; Huangdun Depression

黄河下游河道因受黄土高原泥沙淤积以及黄淮海平原构造地貌的影响,在强度高、变率大的东亚夏季风降水诱发下,地质历史时期频繁地发生泛滥、决溢、改道^[1-2],给两岸经济社会发展带来巨大损失^[3-5]。因此,厘清黄河下游河道在地质历史时期的演化规律,有利于科学合理地治理黄河以及洪灾防范。黄河下游湖泊是黄河在黄淮海平原纵横摆荡的产物,即一旦湖泊所在地区被黄河洪泛淹没,相应的沉积过程就会发生。因此,黄河下游湖泊成为记录黄河河道变迁和沉积环境演变的天然档案^[6-7]。吴艳宏等^[8]通过对南四湖南部微山湖与北部独山湖沉积环境分析,揭示了南四湖3 000年以来南北沉积环境的显著差异并指出这些差异与黄河洪泛过程密切相关;侯战方等^[9]通过对梁山泊柱状岩芯沉积物研究,发现940—1215 AD以来,在黄河的多次溢流、改道影响下,梁山泊经历了不断扩张、淤积、再扩张和逐渐消失的演化过程;魏本杰等^[10]结合大野泽钻孔沉积特征,发现大野泽从1194 AD开始由湖沼相沉积逐渐转变为河流相沉积,这一转变与黄河于1194 AD南迁入黄海的时期相一致。以往研究多基于沉积粒度、孢粉、总有机碳(TOC)、元素等常规地球生物化学指标展开探索,对识别河流洪泛沉积过程产生重要作用^[11-12]。然而,黄河下游湖泊物质来源复杂,既受到黄河频繁洪泛的影响^[13],又接受区域内其他河流及其他物质的影响^[14-15]。根据沉积特征及粒度、元素、孢粉等指标很难有效区别出黄河物质与当地物质的贡献,最终导致提取的黄河河道变迁和沉积环境变化信息不一定精准。亟需更多高效、环境指示意义明确的指标应用于黄河下游湖泊沉积物来源和环境演化识别中去。

磁性矿物在沉积物中普遍存在,已成为指示过去气候环境变迁的重要指标^[16-18]。最近二三十年随着环境磁学和岩石磁学研究手段的大力发展和不断革新,特征性磁学参数的环境意义被进一步明确和细化^[19-20],能够灵敏地反映沉积过程中沉积动力及水、热环境变化^[21-23],同时有效实现了沉积物中不同磁组分识别^[24-33]和提取^[34-41]。基于这些方法和手段,已有研究识别出湖泊沉积物的物源并揭示沉积

环境演化。Wu等^[42]通过研究云南星云湖沉积物中相关磁性参数的变化并结合磁性矿物的热磁和磁滞特性,发现在离湖心不同距离的地点,其入湖物质的来源和组成不同,提取出湖泊沉积物中农作区输入的成壤磁性组分信号;Lisé-Pronovos等^[43]通过沉积物剩磁特性研究,发现等温剩磁的反向中间磁场可以反映通过风力或短距离悬浮携带的中等或粗的磁性颗粒含量变化,进而得出巴塔哥尼亚东南部Laguna Potrok Aike湖中主要磁性矿物是由经南半球西风带来的粉尘物质贡献的,重建了该区域沉积演化历史;Zhong等^[44]利用磁滞回线、FORC图、IRM曲线及 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 χ_{ARM}/χ 等多种磁学指标的综合对比研究,识别出西南岭湖泊沉积物中磁性矿物多来自于湖泊集水区地表土壤侵蚀带来的碎屑物质,揭示了地表侵蚀演变过程;Fu等^[45]通过对松内平原潜水湖泊中磁性物质分析,发现第四纪河流相沉积物和集水区富含腐殖质的黑色土壤主要包含自然来源的亚铁磁性矿物,但是含量较低。然而,在之后的沉积物中,磁铁矿在磁性矿物中所占的比例大为增加,这与人类活动息息相关,进而有效地揭示了研究区人类世开始的时间。

虽然磁性矿物特征研究在湖泊研究中已经取得了较为丰硕的成果,但在沉积环境复杂多变的黄河下游湖泊研究中仍较为欠缺。本研究首先通过对黄河下游现代沉积物(黄河河漫滩样品、大汶河河漫滩样品和莱泰山区碎屑岩石样品)与大野泽钻孔洪泛沉积物磁性矿物研究,揭示不同来源沉积物的磁性特征差异,明确磁性特征分析在物源识别中的有效性,进而用来指导识别黄河下游湖泊沉积物的潜在物源。其次,不同来源物质的磁性差异集中体现在不同磁性参数上,基于特征性磁性参数探析苏北黄墩洼地钻孔沉积物记录的沉积过程,并结合粒度、粒度端元组分、TOC等指标,提取黄河下游河道变迁和沉积环境变化信息。

1 研究区沉积环境与湖泊演化概况

黄河下游自晚更新世以来曾先后出现过180多个湖泊、积水洼地^[7],其中鲁西南地区的平原浅水型

湖泊众多。随着黄河的泛滥、改道,这些湖泊不断地演化、迁移甚至消亡^[46]。大野泽就是其中的典型代表(图1a—b)。大野泽,又名巨野泽,根据《左传》记载,最早现于春秋战国时期,之后深受黄河变迁的影响^[47]:公元前132年,黄河在瓠子决口,黄河水第一次侵入大野泽;公元11年黄河再次决溢、改道,河水注入大野泽,之后大野泽多次接受和失去黄河水注入,其面积不断盈缩;经受黄河多次淤积抬高之后,大野泽于公元944年北扩至梁山以北,至北宋注入大野泽的黄河洪泛日益频繁,湖面不断扩大,形成梁山泊;公元1194年黄河于阳武决口,再次侵入大野泽,但是短暂洪水注入之后发生了严重淤积,之后随着黄河南迁,湖水退却,大野泽和梁山泊于清朝中期之后消亡^[47]。因此,大野泽湖盆分布区的沉积物记录了黄河北流路径上的变迁历史^[9-10]。

苏北黄墩洼地则与黄河南迁过程密切相关(图1a、c)。黄墩洼地地处苏北平原,属于沂沭泗河流域^[48],东侧紧邻骆马湖,位于郯庐断裂带中的一组北北西向断裂切割所形成的断块上^[49]。黄墩洼地作为区域集水中心,自公元前四世纪到公元11年,开始有部分黄河水道流入黄墩洼地^[3,50]。公元1494年,黄河袭泗夺淮之后,由于黄墩洼地东部被马陵山阻隔,南部又有黄河夺泗河道加积,黄河、沂水等水系频繁泛滥,在洼地不断汇集、扩大,由此形成骆马湖^[49]。因此,在骆马湖形成与演化的各个阶段,区域性河流洪泛物质及黄河携带的大量黄土、泥沙物质会汇聚并堆积在古黄墩洼地的地层之中。古黄墩洼地沉积物成为记录黄河河道变迁,尤其是整体南流时期,黄河下游决溢、改道的重要地质载体。

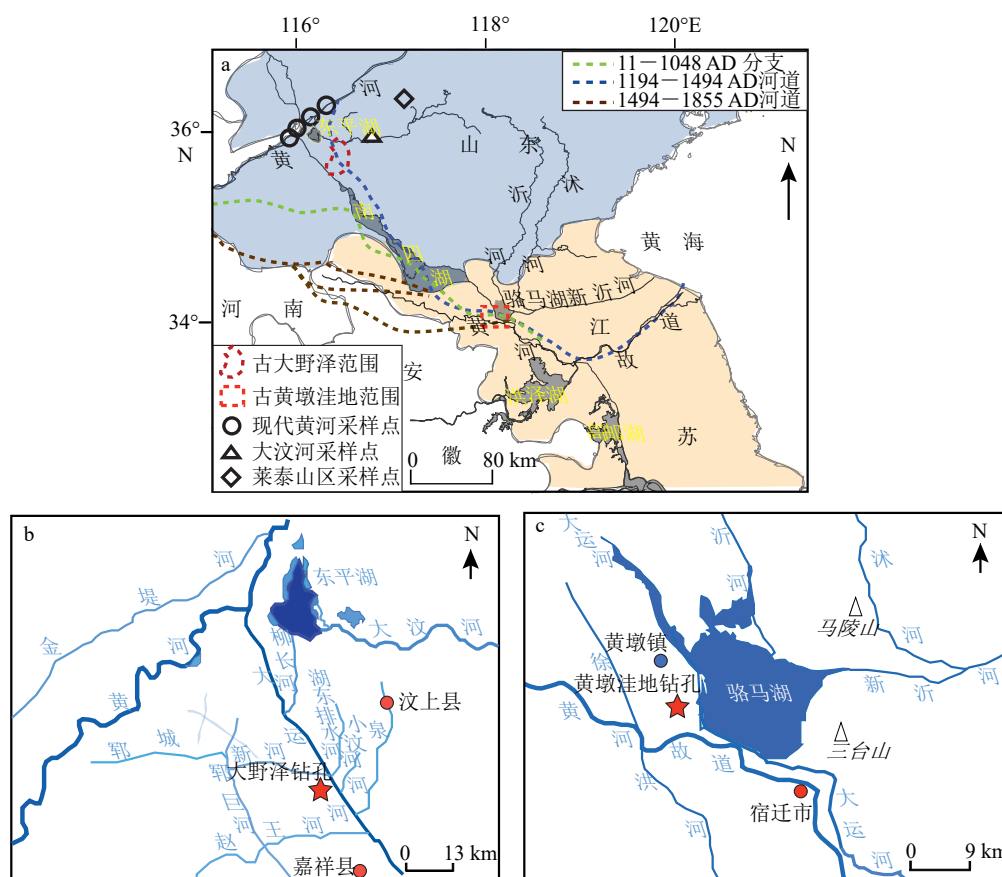


图1 研究区及采样点位置

a: 古大野泽与古黄墩洼地大致位置(依据文献资料^[9,49,51]、区域地质图及野外考察确定)以及黄河下游现代采样点位置; b: 大野泽钻孔位置及局域环境; c: 黄墩洼地钻孔位置及局域环境。

Fig.1 Study area and location of sampling points

a: The approximate locations of ancient Dayeze Lake and ancient Huangdun Depression (based on literatures^[9,49,51], regional geological maps, and field investigations), as well as the modern sampling points in the lower reaches of the Yellow River; b: location and local environment of drilling hole in Dayeze Lake; c: location and local environment of drilling hole in Huangdun Depression.

2 材料与方法

2.1 样品采集

根据已有大野泽钻孔柱状岩芯(图 2a)^[10, 12], 选取 37.04 cm 和 51.15 cm 处深受河流洪泛过程影响的样品作为大野泽洪泛层典型样品(DYZ)。选取现代黄河山东济南以西段采样点 4 处, 获取典型黄河河漫滩样品(HH)4 个。鲁西南古湖作为典型的黄河下游浅水型湖泊, 除了受黄河频繁决溢、改道的影响外, 还与区域性河流演化密切相关。因此, 选择大野泽重要的区域性水源——古汶水(现代大汶河)采样点 1 处, 获取现代大汶河河漫滩典型样品(DW)1 个。此外, 大汶河沉积物受莱泰山区碎屑物质影响较深, 因此采集莱泰山区碎屑岩石样品(TS)1 个。样品用于环境磁学和岩石磁学指标测试, 并基于测试结果进行物源分析。

根据已有黄墩洼地钻孔柱状岩芯(ZN)(图 2b)^[52], 选取 1 个植物残体和 2 个有机沉积物样品进行

AMS ¹⁴C 测年。年代经过 INTCAL20 dataset 程序校正, 且以两个典型黄河改道事件出现年代作为控制点进行年代检验, 运用“Undatable”软件构建了年代-深度模型(黄墩钻孔具体沉积年代的构建请参考 Zhang 等^[52])。最终界定钻孔底部年代大致为 9712 aBP。选取 276 个样品用于磁化率和等温剩磁等磁学指标测试, 选取 124 个样品进行 TOC 和粒度指标测试。根据前期研究^[52], 基于沉积相、粒度及粒度端元组分等变化将 ZN 钻孔分为上下两个部分, 分界线大致位于 13 m 处(相应年代为 4201 aBP)。另外, 选取 32 个黄土高原现代表土样品, 进行相关磁学指标测试, 用以辅助分析。基于上述样品, 探讨古黄墩洼地的沉积环境演化。

2.2 实验方法

2.2.1 磁学指标测量

在室温条件下, 使用 Bartington MS₂ 磁化率仪在不同频率下(4700、470 Hz)下可以获取高频磁化率(χ_{hf})、低频磁化率(χ_{lf}), 并计算出频率磁化率($\chi_{fd}=\chi_{lf}-\chi_{hf}$)。使用 ASC scientific 脉冲磁力仪获得

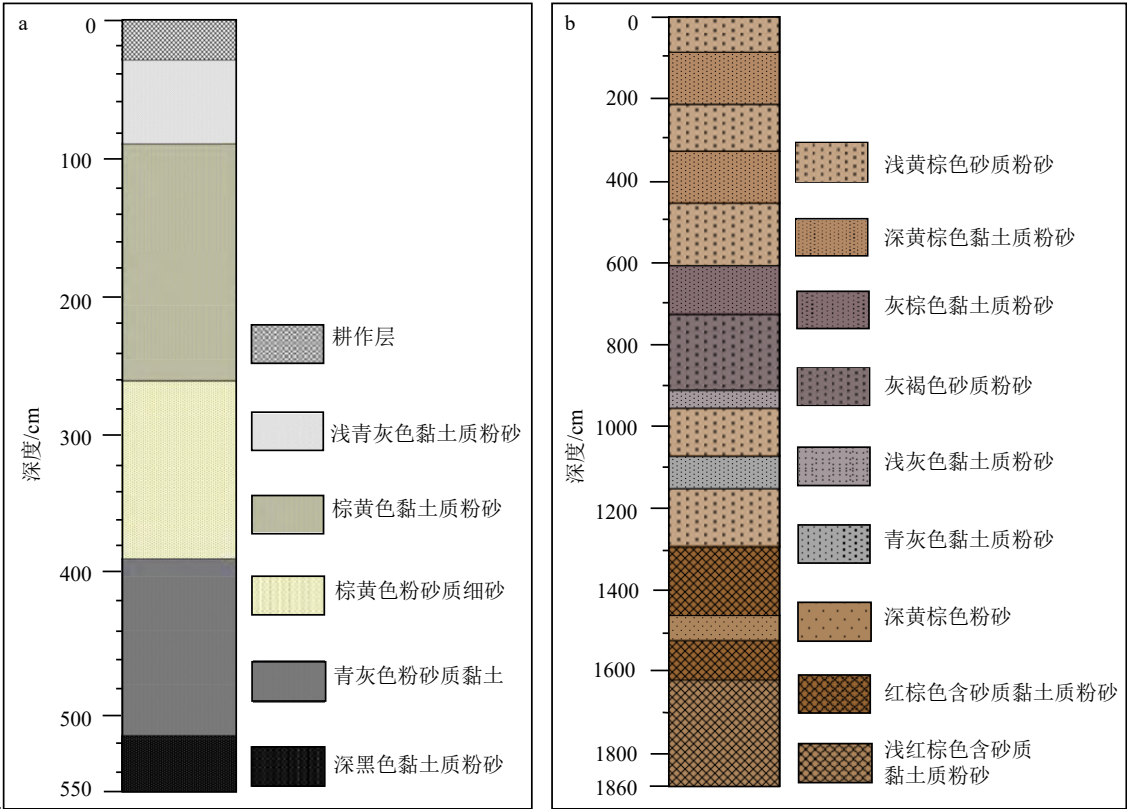


图 2 黄河下游湖泊钻孔岩性

a: 大野泽钻孔岩性, 改自魏本杰等^[10]; b: 黄墩洼地钻孔岩性。

Fig.2 Lithology of drilling holes in lakes of the lower Yellow River

a: The lithology of drilling hole in Dayeze Lake (modified from Wei et al.^[10]), b: the lithology of drilling hole in Huangdun Depression.

相关样品的剩磁。然后,使用 AGRCO JR-6A 旋转磁力仪进行剩磁测量,获得饱和等温剩磁(SIRM)和不同反向磁场等温剩磁。 $IRM_{-100\text{ mT}}$ 和 $IRM_{-300\text{ mT}}$ 分别为首先获得 SIRM 后,再施加 100 mT 和 300 mT 反向磁场获得的剩磁。高矫顽力组分携带的剩磁可以用 HIRM 来表示,表达公式为: $HIRM=0.5*(SIRM+IRM_{-300\text{ mT}})$ 。非磁滞剩磁(ARM)的获取是先用 Magnon International AF Demagnetizer 交变退磁仪(施加的恒定弱直流场为 0.05 mT,交变磁场为 100 mT)获得剩磁,然后通过 AGRCO JR-6A 旋转磁力仪测量剩磁(精度: $2\times 10^{-6}\text{ A/m}$)。对 ARM 标准归一处理后得到 χ_{ARM} 。

PMC 振动样品磁力仪(MicroMag 3900)用来测量样品磁滞回线、一阶反转曲线(FORC)及等温剩磁曲线。通过磁滞回线测量可以获得相关磁滞参数。利用非线性端元模型^[35]对等温剩磁曲线进行分离,可以获得不同磁性组分信息。AGICO MFK1-FA Kappabridge 磁化率仪在通氩气的环境中可以测量磁化率随温度的变化情况,即热磁曲线(χ - T 曲线)。MPMS-XL5 超导量子干涉仪可以在零磁场中由 300 K 冷却到 20 K,然后施加 2.5 T 磁场获得 SIRM。之后,逐渐升温到 300 K,获得等温剩磁随温度变化曲线,即 ZFC-FC 曲线。

2.2.2 非磁学指标测量

利用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,在转速为 1 500 转/min、80 Hz 的超声频率下,对样品进行粒度测试。仪器测量范围为 0.02~2 000 μm ,实验误差 $\leq 0.1\%$ 。在样品进行粒度测试之前,需要对样品进行前处理。首先,将 0.23~0.26 g 去除杂质和植物根系的样品放入烧杯,注入 10 mL 双氧水溶液并加热,直至反应完全。之后,置入 10 mL 盐酸溶液,继续反应,待反应结束、冷却后注满蒸馏水,静置 12 h 后将上层清液抽出,使烧杯中剩余 20 mL 溶液。最后,向烧杯中注入 10 mL 的分散剂溶液进行超声波震荡,5 min 后将高分散颗粒悬浮液放入激光粒度仪中进行测量。利用端元模型^[53]对测试获得的粒度参数进行分离,获取不同粒级组分信息。

基于 Multi N/C3100 型总有机碳分析仪,在 0~30 000 mg/L 的测试范围内获取样品总有机碳(TOC)。在测试之前需对样品进行前处理。首先,利用 5~6 mL 浓度为 10% 的 HCL 去除样品中的碳酸钙;之后,离心并用去离子水冲洗样品数次,直到悬浮液呈中性,冷冻干燥 48 h;最后,使用玛瑙研钵研磨干燥的样品并进行测量。

3 结果与分析

3.1 磁性矿物类型

χ - T 结果(图 3a—d)显示 HH 和 DYZ 样品表现为相似的磁性特征,DW 和 TS 样品表现为相似的磁性特征。HH 和 DYZ 样品的 χ - T 曲线(图 3a—b)显示初始磁化率较低,说明磁性矿物受沉积后环境的改造作用影响,一些强磁性矿物被还原成磁性较弱的矿物。其加热曲线和冷却曲线之间的差值较大,说明在加热的过程中有一些新的磁性矿物生成。DW 和 TS 样品(图 3c—d)初始磁化率略高于 HH 和 DYZ 样品,指示强磁性矿物受沉积后环境的改造作用没有 HH 和 DYZ 样品明显。但是,磁性矿物冷却曲线仍高于加热曲线,反映在加热过程中也生成了相应的磁性矿物。两类样品初始磁化率的差异,体现了二者在磁性矿物组成上存在差异。此外,DW 和 TS 样品在 580℃ 左右磁化率存在明显的断崖式降低,对应典型磁铁矿的居里温度,指示磁铁矿的存在。HH 和 DYZ 样品在 520℃ 之后磁化率不断降低,在 580℃ 左右降到最低,指示磁铁矿依然为主要的磁性矿物,但是磁铁矿在一定程度上受到沉积过程的影响和改造。

ZFC 曲线揭示随着温度的增加等温剩磁逐渐降低(图 3e)。当温度超过 120 K 时,HH 和 DW 样品携带剩磁的能力均显著降低,但 HH 携带的剩磁显著高于 DW。当温度继续增加到 300 K,HH 样品仍保持 30% 以上的剩磁,DW 样品所携带的剩磁仅为 20% 左右。两个样品的 ZFC 一阶导数在 120 K 左右表现出明显的 Verwey 转化特征谷,指示亚铁磁性矿物磁铁矿的存在。这与 χ - T 曲线鉴定出的两类样品中主要的磁性矿物为磁铁矿相一致。与此同时,HH 样品的 Verwey 转化特征谷高于 DW 样品,揭示在黄河沉积物中磁铁矿很可能受到沉积过程的影响和改造,磁铁矿不断发生氧化,使 Verwey 转化特征谷发生一定程度上的变形。ZFC 曲线及其一阶导数以及 χ - T 结果相互一致,共同指示不同来源的沉积物其磁性矿物类型存在差异。

3.2 磁性成分和粒径大小

HH 和 DYZ 样品的磁滞回线(图 4a—b)表现为典型的细腰型,在 0.6 T 外加磁场之前没有发生闭合,指示软磁性矿物和硬磁性矿物组分共同存在。DW 和 TS 样品的磁滞回线(图 4c—d)上升和下降

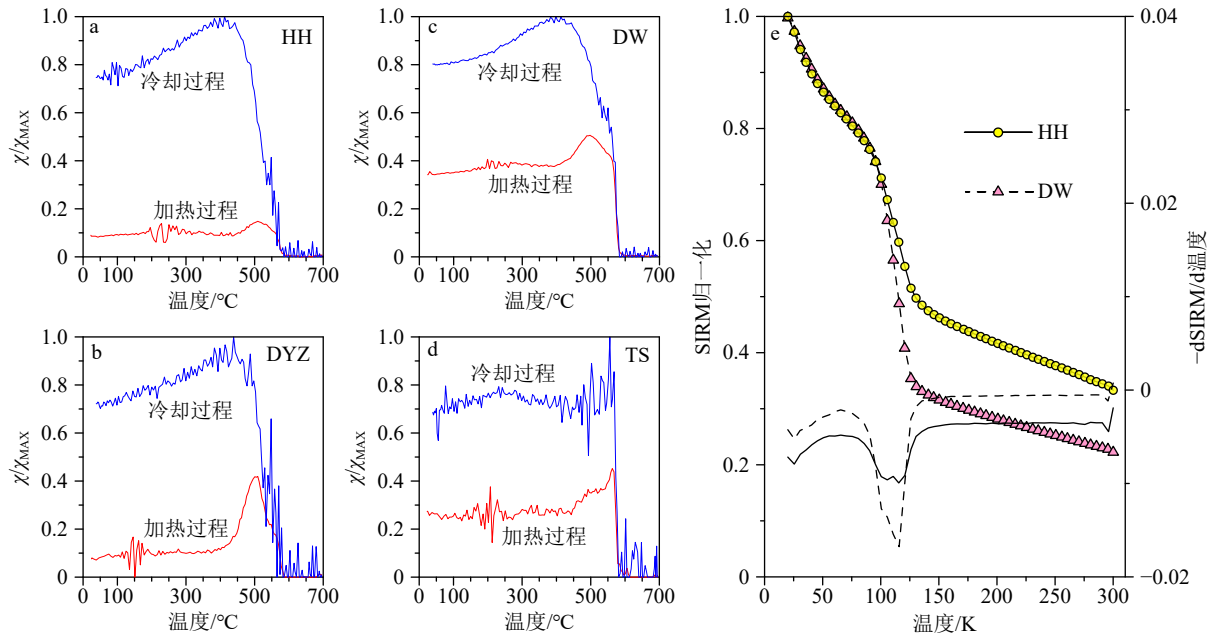


图3 典型样品热磁特征

a-d: 磁化率随温度变化曲线($\chi-T$); e: 低温环境中直流与交流变换系统下磁化强度变化曲线(ZFC)(黄色圆和红色三角组成的曲线, 纵坐标为“SIRM 归一化”)及其一阶导数(黑色实线和虚线, 纵坐标为 $-dSIRM/dT$)。HH 为黄河样品, DYZ 为大野泽洪泛沉积样品, DW 为大汶河样品, TS 为莱泰碎屑岩样品。

Fig.3 Thermomagnetic characteristics of typical samples

a-d: Temperature dependent curve of magnetic susceptibility ($\chi-T$); e: magnetization intensity variation curve (ZFC) (the curves composed of yellow circles and red triangles with the vertical axis being “SIRM normalization”) and its first derivative (black solid and dashed lines with the vertical axis are “ $-dSIRM/dT$ ”) under DC and AC conversion systems in low-temperature environments. HH: the Yellow River sample; DYZ: the Dayeze Lake fluvial sediments sample; DW: Dawen River sample; TS: the Laitai clastic rock sample.

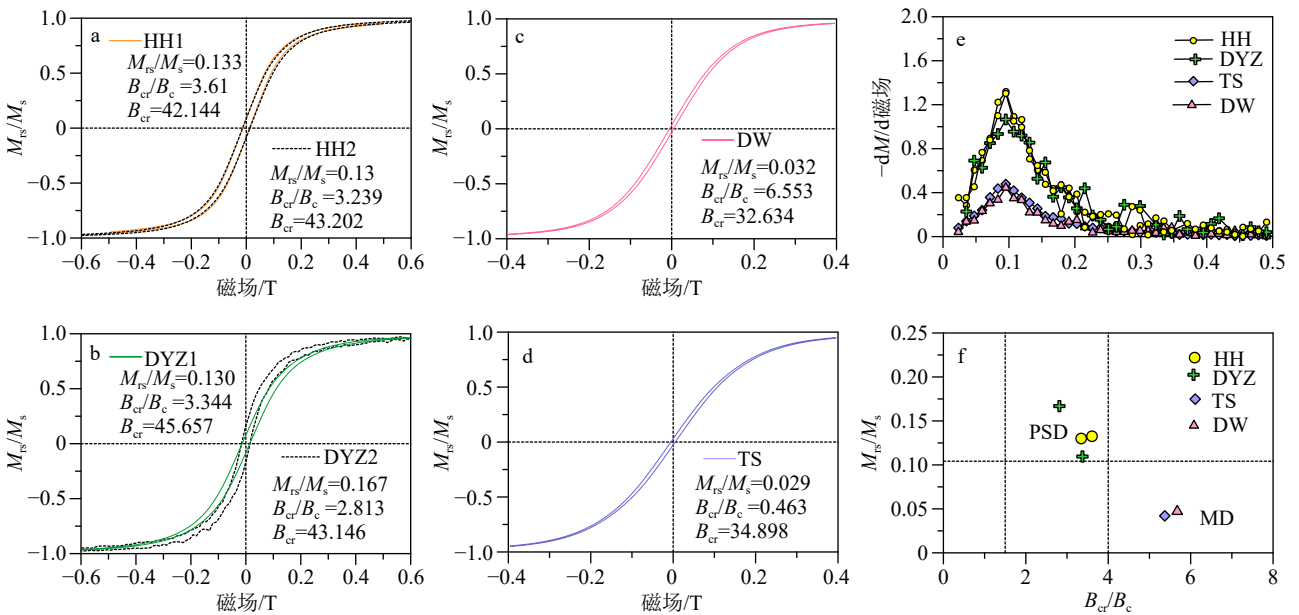


图4 典型样品磁滞特征

a-d: 磁滞回线, e: 磁滞回线上下两条分支曲线差值相对于外加磁场一阶导数曲线 ($-dM/d$ 磁场), f: Day 氏图。HH, DYZ, DW 和 TS 样品同图 3。

Fig.4 Hysteresis characteristics of typical samples

a-d: Hysteresis loops, e: the difference between the upper and lower branch curves of the hysteresis loop and the first-order derivative curve relative to the applied magnetic field ($-dM/d$ magnetic field), f: the Day Plot. HH, DYZ, DW, and TS are the same to those in Fig. 3.

分支曲线更趋近于重合, 并且在 0.3 T 外加磁场处出现完全闭合, 指示磁性组分以软磁性矿物为主, 高矫顽力成分贡献微小。从磁滞参数上看, HH 和 DYZ 样品的剩磁矫顽力相似, 在 42~45 mT 范围, DW 和 TS 样品的剩磁矫顽力低于前者(分别为 32.6 和 34.9 mT)。此外, 磁滞回线的一阶导数结果(图 4e)显示所有样品均在 100 mT 之前出现软磁性成分特征峰值, 但是 HH 和 DYZ 样品的特征峰显著高于 DW 和 TS 样品的特征峰。在 300 mT 左右, HH 和 DYZ 显示高矫顽力组分赤铁矿特征峰, 而在 DW 和 TS 中没有出现此峰, 说明 HH 和 DYZ 样品的赤铁矿含量显著高于 DW 和 TS 样品。

从 Day 氏图(图 4f)中可以看出, HH 和 DYZ 样品均落在假单畴(PSD)区域, DW 和 TS 样品落在多畴(MD)区域, 说明 DW 和 TS 样品有着比 HH 和 DYZ 样品更粗的磁性颗粒。然而, 由于在不同的地质沉积环境中, 大小磁性颗粒常常是混合在一起的, 而且磁性颗粒间的磁相互作用也会影响磁滞参数^[54], 进而综合表现为 PSD 状态。因此, 相比于 Day 氏图, Néel 图^[55](图 5a)和 Lascu 图^[56](图 5b)能够更好地展现磁性颗粒的磁畴大小以及不同磁性颗粒混合情况。Néel 图显示 DW 和 TS 样品集中于 MD 区域, 说明这两类样品磁粒径较粗。HH 和 DYZ 样品

分布较为靠近, 且与 MD 区域存在一定距离, 说明二者 MD 颗粒含量不及 DW 和 TS 样品。此外, HH 和 DYZ 样品靠近单轴单畴+超顺磁(USD+SP)颗粒三角形分布区的右下角区域, 指示样品受到 USD 和 SP 颗粒的混合影响但是总体影响较小。Lascu 图(图 5b)显示磁性颗粒间的相互作用对这些样品影响较小, 但是不同粒径大小磁性颗粒的混合产生比较大的影响。DW 和 TS 样品更靠近典型 MD 颗粒区域, 整体粒径大于 HH 和 DYZ 样品。相比于 Néel 图, Lascu 图更好地揭示了 HH 和 DYZ 样品之间的差异。HH 样品更靠近 MD-SD 混合曲线, 而 DYZ 样品更接近 MD-UNISD(单轴非相互作用单畴)混合曲线, 揭示 DYZ 样品含有部分 UNISD 颗粒而 HH 样品中几乎没有。已有研究表明在湖泊沉积物中生物来源的磁性颗粒往往是 UNISD 颗粒的重要组成部分^[57]。因此, Lascu 图中 DYZ 样品与 HH 样品的磁性差异, 主要归因于湖相沉积过程的改造作用。即便如此, HH 和 DYZ 样品磁性颗粒组成和粒径的相似程度远远高于 DW 和 TS 样品, 反映了相似的物质来源。

3.3 不同端元磁组分

基于 BatchUnMix 方法^[37]获得的 IRM 分离结果

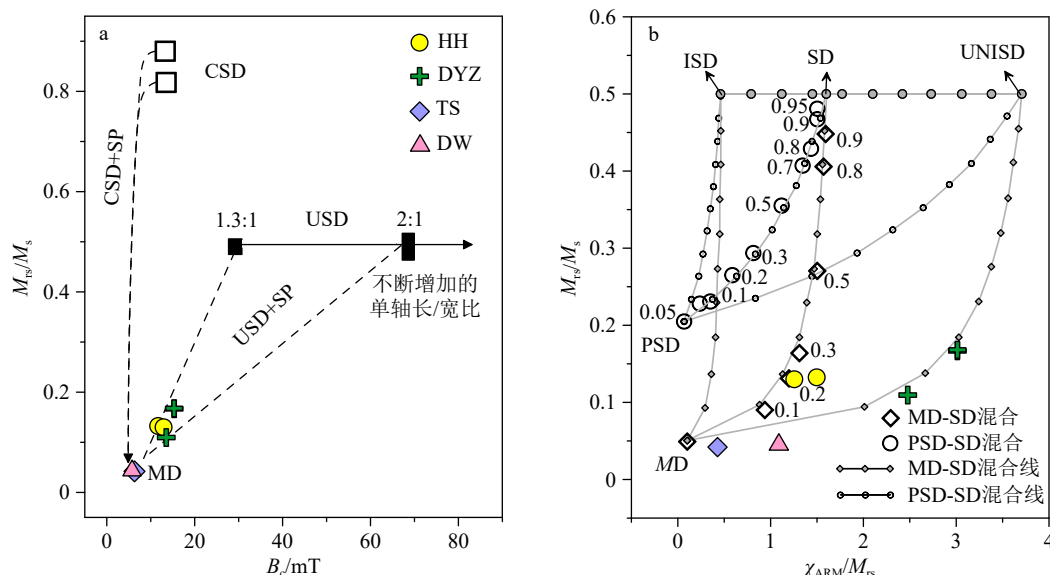


图 5 典型样品的磁畴状态

a: Néel 图^[55], b: Lascu 图^[56]。SD: 单畴, MD: 多畴, SP: 超顺磁颗粒, PSD: 假单畴, USD: 单轴单畴, CSD: 稳定立方单畴, ISD: 磁相互作用单畴, UNISD: 单轴非相互作用单畴。HH, DYZ, DW 和 TS 样品同图 3。

Fig.5 Magnetic domain states of typical samples

a: The Néel plot^[55], b: the Lascu plot^[56]. SD: single domain, MD: multi-domain, SP: superparamagnetic particles, PSD: pseudo-single domain, USD: uniaxial single domain, CSD: cubic single domain, ISD: interacting single domain, UNISD: uniaxial noninteracting single domain. HH, DYZ, DW, and TS are the same to those in Fig. 3.

显示 HH 和 DYZ 样品、TS 和 DW 样品分别具有相似的磁组分(图 6a—h)。HH 和 DYZ 的组分 1 展现较宽的矫顽力($B_{1/2}$)分布(DP 数值较大),其峰值分别集中在 53.8 mT 和 56.8 mT,分别贡献了 90.6% 和 86.1% 左右的剩磁,成为最主要的磁组分。该组分对应被改造的碎屑磁铁矿^[58],但是其 $B_{1/2}$ 略小于典

型黄土中被改造的碎屑磁铁矿,这可能与河流和湖泊沉积过程的改造作用有关。此外,沉积物中磁铁矿化石也表现为相似的特征^[59-60],表明 HH 和 DYZ 样品中也包含一部分生物贡献的碎屑磁铁矿。另外两个组分呈现低的剩磁贡献率(在 HH 中分别为 3.4% 和 6%,在 DYZ 中分别为 3% 和 10.9%),是 HH

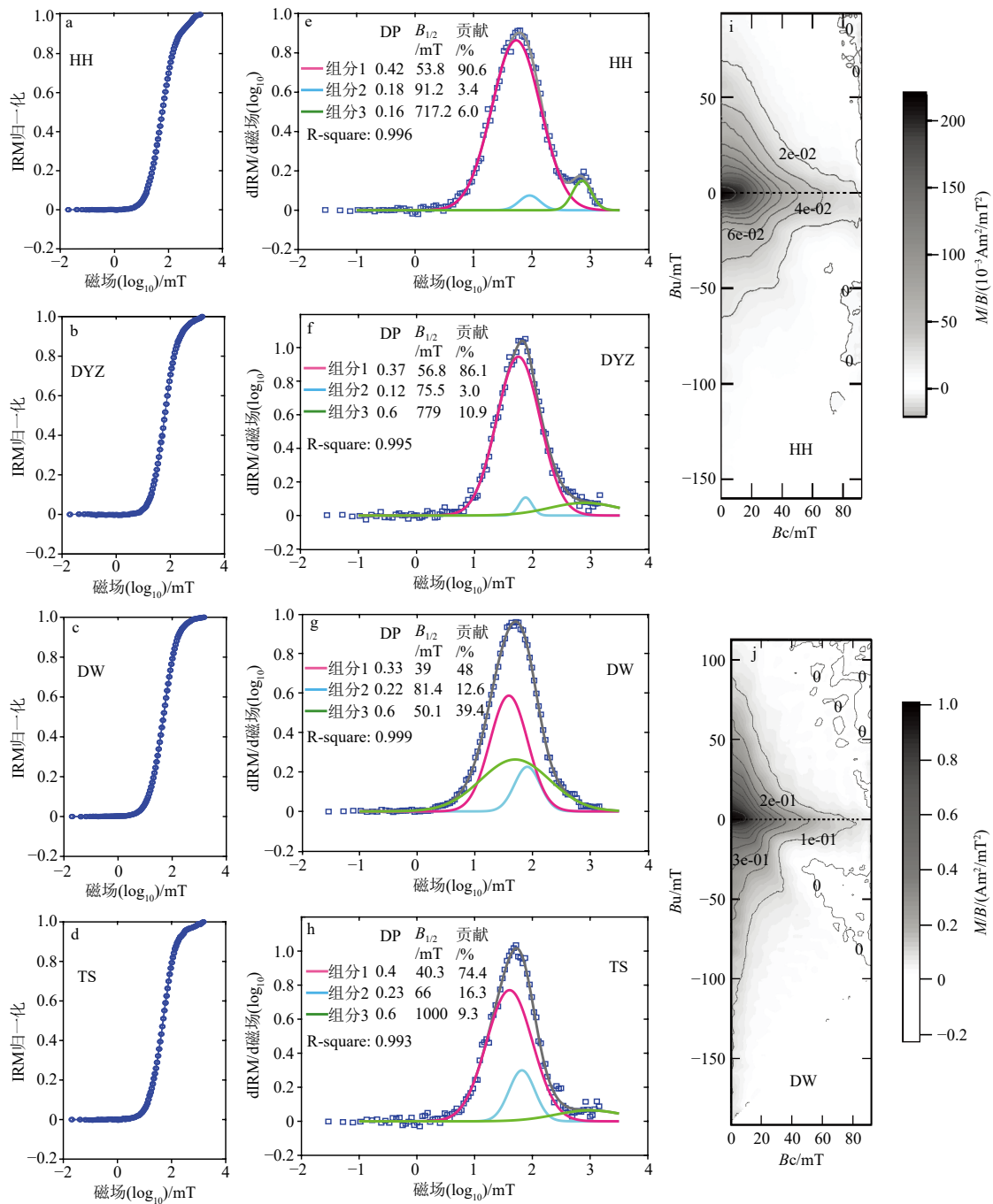


图 6 典型样品的磁组分

a-d: IRM 获得曲线, e-h: 使用 Batch UnMix 方法^[37]获得的组分模型, i-j: 一阶反转曲线 (FORC) 图。HH, DYZ, DW 和 TS 与图 3 一致。

Fig.6 Magnetic components of typical samples

a-d: IRM acquisition curve, e-h: component model based on Batch UnMix method^[37], i-j: first-order reversal curve (FORC) diagram. HH, DYZ, DW, and TS are the same to those in Fig. 3.

和 DYZ 样品中的次要组分。此外, 在 HH 和 DYZ 样品中组分 2 的 $B_{1/2}$ 数值均高于组分 1, 指示少量碎屑磁赤铁矿^[58]的存在。但组分 2 在 HH 和 DYZ 样品中差异较大, 反映不同沉积环境对碎屑磁赤铁矿的改造程度存在差异。组分 3 在 HH 和 DYZ 样品中差异较小, 高的 $B_{1/2}$ 数值对应高矫顽力磁性矿物-碎屑赤铁矿^[58]。

DW 和 TS 样品具有相似的低矫顽力组分(组分 1), 该组分对剩磁的贡献最大, 为两个样品最主要的成分。其 $B_{1/2}$ 集中在 40 mT 左右, 低于 HH 和 DYZ 组分 1 的 $B_{1/2}$ 。矫顽力受磁性颗粒粒径大小的影响, 通常当粒径位于 PSD-MD 区间内, 随着颗粒变粗矫顽力不断降低^[61]。根据 Day 氏图结果(图 4f), DW 和 TS 样品的磁性颗粒(集中在 MD 区域)远远大于 HH 和 DYZ 样品(集中在 PSD 区域)。此外, 相比于 HH 样品, DW 样品的 FORC 图(图 6i-j)沿横轴展布的等值线中心更向左偏, 沿纵轴展布的等值线开口更大, 指示 DW 样品有着更大的磁性颗粒^[31, 62]。因此, DW 和 TS 样品组分 1 代表的是粗颗粒碎屑磁铁矿。DW 和 TS 样品的组分 2 与被改造的碎屑磁铁矿表现为相似的特征^[58], 但是 DW 样品的 $B_{1/2}$ 略高于 TS 样品, 说明在不同沉积环境中碎屑磁铁矿被改造的程度存在差异。此外, 值得注意的是, DW 和 TS 样品的组分 3 截然不同。DW 样品组分 3 的 $B_{1/2}$ 介于其组分 1 和组分 2 之间($B_{1/2}=50.1$ mT), 可能反映了生物成因硬磁组分的贡献。然而, TS 样品组分 3 的 $B_{1/2}$ 高达 1000 mT, 高于碎屑赤铁矿的矫顽力, 可能反映了碎屑赤铁矿与更高矫顽力磁性矿物(如针铁矿)的混合物。

3.4 相关磁性参数

χ 和 SIRM 是指示沉积物中磁性矿物总体浓度变化的重要指标, 反映沉积物集合体整体特征^[18]。其中, MD、PSD 和 SD 级别的亚铁磁性矿物颗粒能够携带稳定剩磁, 是 SIRM 的主要贡献者。由于 SP 颗粒弛豫时间快, 几乎无法携带剩磁, 导致 SIRM 不能提供沉积物中 SP 颗粒变化的信息。与之不同, SP 颗粒具有较高的 χ 。此外, 反铁磁性矿物赤铁矿能够携带剩磁, 但是磁性较弱, 其 χ 低于亚铁磁性矿物。因此, 通过对 χ 和 SIRM 的相关性分析, 能够大致判断沉积物中主要磁性颗粒的类型。图 7a 显示在黄墩洼地钻孔(ZN)下部样品中, 其 χ 与 SIRM 具有很好的相关性($R^2=0.93$), 说明亚铁磁性矿物为主要磁性矿物, 磁性颗粒大小分布较为均匀。在 ZN 上部样品中, χ 与 SIRM 均显著高于

ZN 下部样品, 但二者相关性低于下部样品, 指示磁性组成较 ZN 下部复杂。此外, ZN 上部样品的 χ 和 SIRM 的相关性分布与典型黄河样品更为相似, 指示相似的磁性颗粒组成, 揭示 ZN 上部沉积物与黄河物质有着密切联系。

在各种类型沉积物中, 成壤作用形成的亚铁磁性矿物, 如磁铁矿, 很容易被反向 100 mT 磁场去除掉它们的磁贡献。碎屑来源磁铁矿的矫顽力高于成壤磁铁矿, 但是反向 300 mT 磁场也能够有效去除他们携带的剩磁信号。因此, $S_{100\%}$ 和 $S_{300\%}$ 分别反映软磁性组分对磁性的部分和全部贡献^[24]。图 7b 显示 ZN 上部样品的 $S_{100\%}$ 大多大于 40%, $S_{300\%}$ 基本在 80% 以上, 且与典型黄河和黄土高原现代表土样品的 $S_{100\%}$ 和 $S_{300\%}$ 的相关分布相似。ZN 下部样品的 $S_{100\%}$ 与 $S_{300\%}$ 呈现出两种相反的分模式: 第一种模式表现为 $S_{100\%}$ 和 $S_{300\%}$ 数值均较低且二者呈现负相关(暗绿色空心三角样品); 第二种模式是 $S_{100\%}$ 和 $S_{300\%}$ 数值较高但二者呈现正相关(亮绿色实心三角样品)。这两种不同的分布模式, 显示 ZN 下部样品包含两种不同类型的磁组分, 而且 ZN 下部样品与黄河、黄土高原现代表土和上部样品分布区间相互分离, 体现与之截然不同的沉积环境。进一步的 $S_{300\%}$ 与 χ 、 $S_{100\%}$ 与 χ 以及 HIRM 与 χ 的相关性分析(图 7c-e)发现, ZN 下部模式一样品的 $S_{100\%}$ 及 $S_{300\%}$ 数值均低于模式二样品, 但是 HIRM 却略高于模式二样品, 说明模式一样品属性受到高矫顽力反铁磁性矿物的深刻影响。黄河、黄土高原现代表土和 ZN 上部样品的 χ 、 $S_{100\%}$ 及 $S_{300\%}$ 数值均显著高于 ZN 下部样品, 指示在这些样品中亚铁磁性组分为磁性主要贡献者。与此同时, 较高的 HIRM 数值, 反映这些样品比 ZN 下部样品富含更多的高矫顽力磁组分。此外, ZN 下部典型样品的 χ_{fd} 与 χ 的相关系数高达 0.97, 远高于 ZN 上部典型样品的 0.8, 说明 ZN 下部样品中磁性矿物深受成壤作用影响, 揭示了 ZN 上下两部分沉积物形成于不同的沉积环境。

4 讨论

4.1 黄河下游湖泊沉积物磁性特征与物源识别

在研究的相关样品中, 大野泽沉积物为典型洪泛层物质, 其可能源自于黄河的决溢改道, 也可能与大汶河的洪泛息息相关, 而大汶河沉积物受莱泰山区基岩物质影响深刻。如果磁学指标可以区别

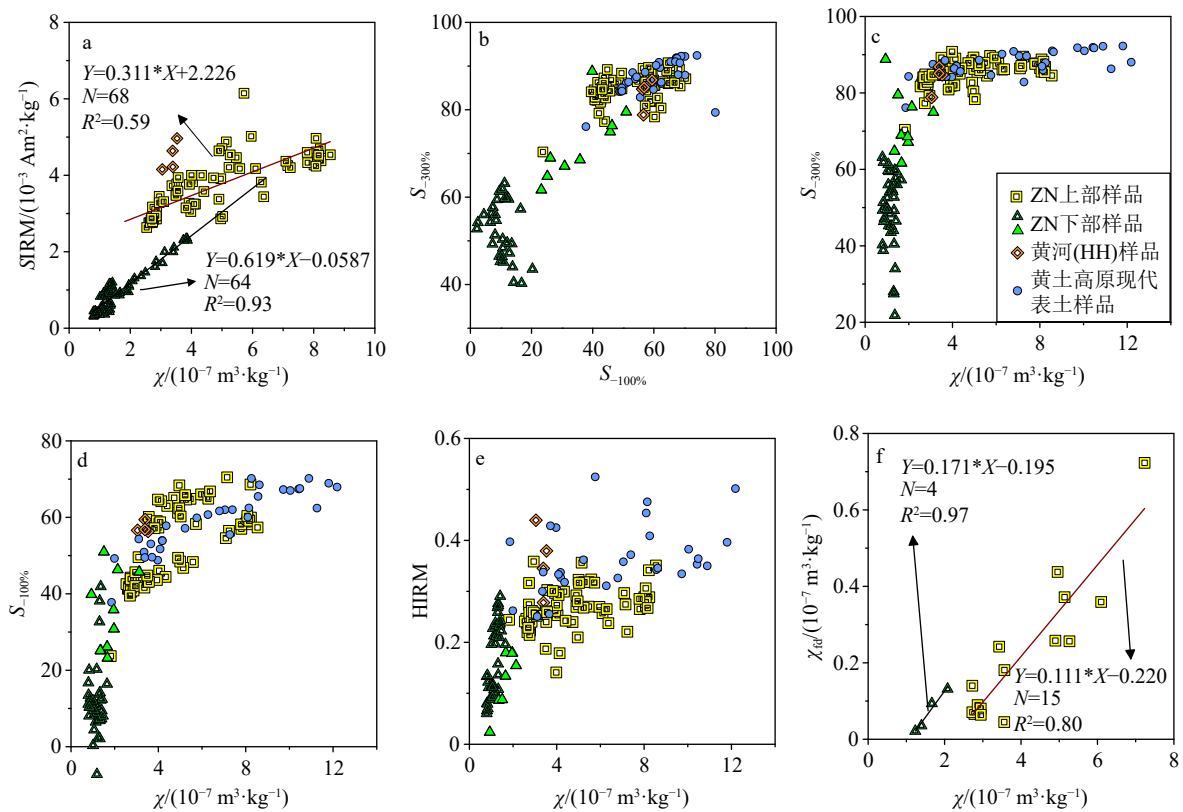


图7 典型样品的磁学参数相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of magnetic parameters of typical samples

不同来源的物质,那么大野泽样品可能与黄河样品或大汶河样品表现为相似的磁性特征,大汶河样品应与其主要源区的莱泰山区风化岩石样品具有相似的磁性特征,物源显著不同的黄河与大汶河样品的磁性特征应存在明显差异。

通过一系列岩石磁学指标测试,发现样品 HH 和 DYZ 的 χ - T 曲线(图 3a—b)、磁滞回线(图 4a—b)、Day 氏图位置(4f)、Néel 图位置(图 5a)及 IRM 分离组分(图 6e—f)均表现为相似的特征,说明 HH 与 DYZ 具有类似的磁性矿物类型、磁粒径大小和磁组分构成,DYZ 样品受到黄河物质显著影响。样品 DW 与 TS 的磁学指标表现形式一致,说明 DW 与 TS 具有类似的磁性矿物类型、磁粒径大小和磁组分构成,DW 受莱泰山区物质影响显著。

进一步对各个磁学指标分析,如: χ - T 曲线显示 580℃ 居里点(图 3a—b)及 $-d\Delta M/d$ 磁场显示约 0.1 T 特征峰(图 4e)揭示 HH 和 DYZ 样品主要磁性矿物类型为磁铁矿;二者磁滞回线呈细长型且在 0.5 T 之后才逐渐闭合,且 $-d\Delta M/d$ 磁场显现约 0.3 T 小峰,指示 HH 和 DYZ 样品中除了磁铁矿还存在一些高矫顽力组分;样品 DW 与 TS 的磁滞回线在 0.3 T 之前早已闭合(图 4c—d)、 $-d\Delta M/d$ 磁场

仅有约 0.1 T 显著高峰却无约 0.3 T 小峰(图 4e),指示 DW 与 TS 的磁性矿物为磁铁矿。此外,HH 样品的 $-dSIRM_{\text{norm}}/dT$ 温度(图 3e)显示的 Verwey 转化特征谷高于 DW,说明黄河沉积物的磁铁矿可能受到了一定程度改造。因此,受黄河显著影响的样品(HH 和 DYZ)与受莱泰山区物质影响的样品(DW 与 TS)在磁性矿物类型上存在差别。

HH 和 DYZ 样品落在 Day 氏图中的 PSD 区域且在 Néel 图中偏离 MD 区域,而 DW 和 TS 样品则落在 Day 氏图的 MD 区域和 Néel 图中典型 MD 位置(图 4f、图 5a)。与此同时,相比于 HH 样品,DW 样品的 FORC 图(图 6i—j)沿横轴展布的等值线中心更向左偏,沿纵轴展布的等值线开口更大。此外,HH 样品的 ZFC 曲线变化幅度小于 DW(图 3e)。这些结果指示 DW 和 TS 样品的磁粒径远大于 HH 和 DYZ 样品^[62-63]。因此,受黄河显著影响的样品与受莱泰山区物质影响的样品在磁性颗粒大小上存在差别。

以上两类不同来源的沉积物在磁性矿物组成和磁粒径上的显著差异也可整体表现为不同的磁组分。IRM 分离结果揭示 HH 和 DYZ 样品、TS 和 DW 样品分别具有相似的磁组分(图 6a—h)。HH

和 DYZ 样品具有相似的低矫顽力和高矫顽力组分(分别反映碎屑磁铁矿和高矫顽力碎屑赤铁矿), 指示黄河泥沙为大野泽洪泛层沉积物的重要物质来源。DW 和 TS 样品存在相同的主要组分, 即低矫顽力粗颗粒碎屑磁铁矿, 揭示在大汶河沉积物中有很大一部分源自于莱泰山区碎屑物质。然而, DW 和 TS 样品在另外两个组分上的差异, 反映除了莱泰山区碎屑物质, 可能还有其他少量物质汇入大汶河, 这些物质中包含了生物成因硬磁组分, 很可能对应地表径流携带的区域物质。

综合以上磁学结果, 黄河和大野泽沉积物样品中主要的磁性矿物为磁铁矿(遭受一定程度改造)及少量高矫顽力矿物。与之相比, 受莱泰山区物质影响的大汶河沉积物样品中磁性矿物较为单一, 主要为磁铁矿且较少遭到改造, 而且磁粒径远大于黄河和大野泽物质。因此, 基于磁性矿物特征可以识别出大野泽典型洪泛层中主要物源为黄河泥沙。此外, 基于磁性分离手段可以提供大野泽洪泛层中不同来源磁组分信息, 可以定量获取洪泛层中黄河泥沙组分的变化, 为进一步理清黄河下游洪泛改道事件提供可能。

4.2 黄河下游湖泊沉积物磁性矿物特征揭示的沉积环境演化

在对大野泽洪泛沉积物与黄河下游地区现代沉积物的磁性矿物研究中, 证实了磁性矿物特征分析在物源识别中的有效性。与此同时, 一些特征性环境磁学参数可以体现磁性矿物特征(如类型、粒径和含量等)差异, 因此可以用来探究湖泊沉积过程及沉积环境变化。此外, 磁性矿物特征分析还发现大野泽洪泛沉积物虽然主要源自于黄河泥沙, 但二者之间仍存在一些差异。Lascu 图较好地揭示了这些差异(图 5b)。在 Lascu 图中, HH 样品更靠近 MD-SD 混合曲线, 而 DYZ 样品更接近 MD-UNISD 混合曲线, 说明 DYZ 样品含有部分生物作用的 UNISD 颗粒^[57], 揭示了湖相沉积过程对磁性矿物颗粒的改造作用。因此, 为更好地解释黄河下游湖泊沉积物记录的信息, 也需要探讨沉积过程和环境。环境磁学参数提供了沉积环境演化的重要线索。

通过对沉积序列较为完整的黄墩古洼地沉积物(ZN 钻孔)研究, 发现各磁性参数在不同沉积层位存在显著差异(图 7)。在 ZN 上部样品中, χ 与 SIRM 数值均显著高于 ZN 下部样品, 但二者相关性低于下部样品, 指示磁性组成较 ZN 下部复杂。此外, ZN 上部样品的 χ 和 SIRM 的相关性分布与典型

黄河样品更为相似, 揭示 ZN 上部沉积物与黄河洪泛过程联系密切。进一步的 $S_{100\%}$ 与 $S_{300\%}$ 、 $S_{100\%}$ 与 χ 、 $S_{300\%}$ 与 χ 以及 HIRM 与 χ 相关性分析显示, 黄河、黄土高原现代表土及 ZN 上部样品各磁性参数分布模式相似, 富含大量的亚铁磁性组分及部分高矫顽力磁组分, 且两类磁性组分含量均高于 ZN 下部样品。这些磁性参数揭示黄墩洼地上部沉积物受到黄河洪泛过程的影响深刻, 具备黄河携带的大量黄土物质的磁性特征。然而, 黄墩洼地下部沉积物与黄河物质联系不大。此外, ZN 下部典型样品的 χ_{fd} 与 χ 的相关系数高达 0.97, 远高于 ZN 上部典型样品的 0.8, 说明 ZN 下部样品中磁性矿物深受成壤作用影响, 进一步揭示了 ZN 上下两部分沉积物形成于不同的沉积环境。

结合其他环境代用指标分析(图 8), 发现 χ 、TOC 和粒度组分 2^[52] 在上部沉积物中存在一致变化, 峰值和谷值依次交替出现。峰值对应较细的沉积物粒径, 谷值对应较粗的沉积物粒径, 这与黄河洪泛形成的典型沉积二元结构(即砂质粉砂-黏土质粉砂互层, 详见 Zhang 等^[52])相一致。此外, 基于 χ 与 χ_{fd} 较好的相关性($R^2=0.8$)(图 7f), 说明在上部沉积物中存在与成壤作用相关的细粒亚铁磁性颗粒。这些磁性颗粒可能是源区成壤磁性颗粒被黄河洪水搬运输入的, 也可能是源区物质输入到黄墩洼地后经过成壤作用形成的。然而, 如果黄墩洼地发生后期成壤过程, 则需要黄河洪水彻底退出黄墩洼地, 且洼地转化为氧化环境(即洼地干涸)。一旦洼地干涸, 水生或半水生植物就会大大减少甚至死亡, 此时 TOC 值应该会大为降低。然而黄墩洼地此阶段的 TOC 峰值与磁化率峰值呈现出很好的对应关系。因此, 黄墩洼地这一沉积阶段不管是磁性矿物还是有机植物残体很大程度上均来自于黄河洪泛过程。根据前期研究^[52], 粒度组分 2 能够很好地表征这些物质, 它们可能还包括当地的成土物质、风成物和一些区域内河流贡献的物质。在下部沉积物中, χ 和 TOC 整体数值较低, 没有出现明显的峰、谷变化, 且下部沉积序列不再表现出典型的黄河洪泛沉积二元结构^[52], 指示黄河洪泛过程的影响微弱。不同于 χ 和 TOC, 在此阶段粒度组分 2 整体数值没有明显降低, 反映局地细粒物质贡献增加, 进一步证实此阶段几乎没有受到黄河洪泛过程的影响。

SIRM/ χ 与 χ 、TOC 和粒度组分 2 的变化相反, 尤其是在上部沉积环境中表现明显。SIRM/ χ 主要用来表征磁铁矿的富集程度^[64], 其在上部沉积环境

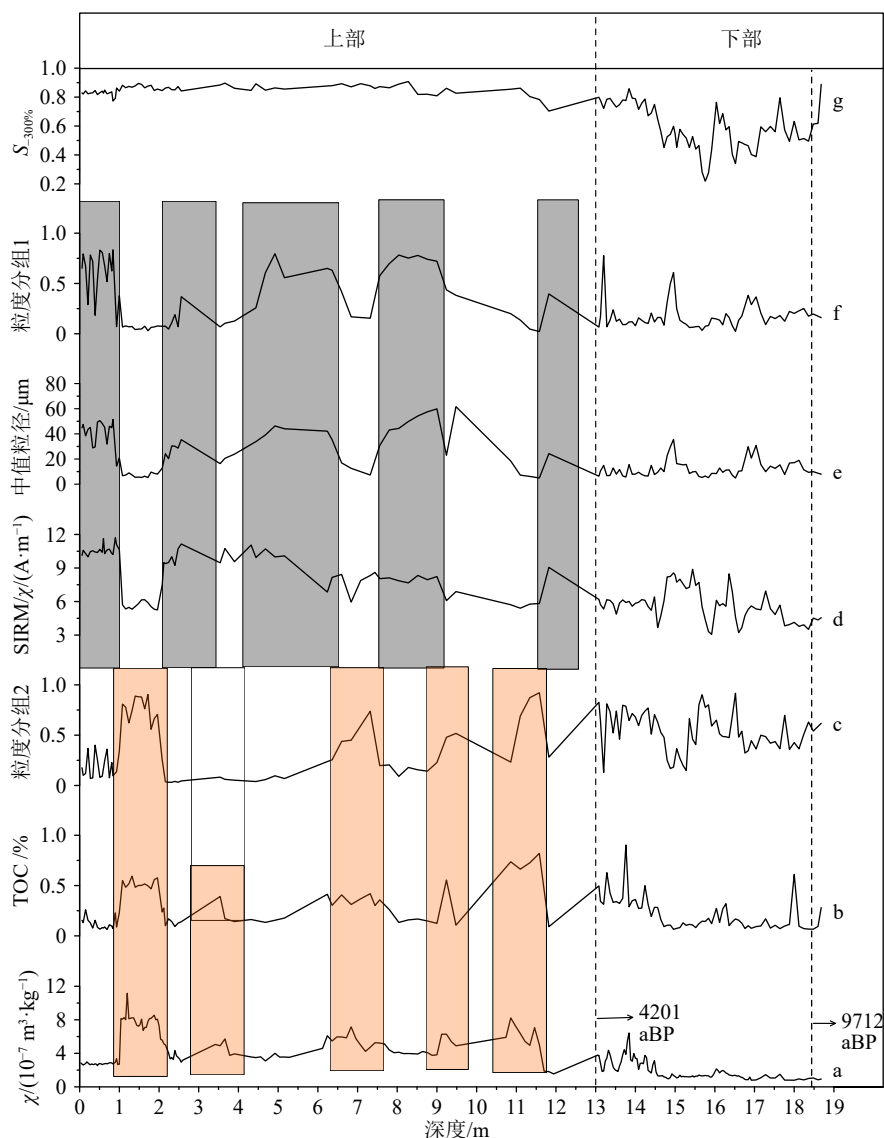


图 8 黄墩洼地 (ZN 钻孔) 磁性参数与其他环境代用指标变化

a: 磁化率(χ_{lf}), b: TOC, c: 粒度分离获得的组分 2^[52], d: $SIRM/\chi_{lf}$, e: 中值粒径, f: 粒度分离获得的组分 1^[52], g: $S_{300\%}$ 。13 m 处(左侧黑色虚线)为不同沉积环境分界线, 对应 4 201 aBP^[52]。钻孔底部年龄(右侧黑色虚线)为 9 712 aBP^[52]。橙粉色和灰色分别对应河流作用下二元结构中的细颗粒和粗颗粒成分。

Fig.8 Changes in magnetic parameters and other environmental indicators in the Huangdun ancient depression (ZN borehole)

a: Magnetic susceptibility (χ_{lf}), b: TOC, c: component 2 obtained from grain-size unmixing^[52], d: $SIRM/\chi_{lf}$, e: median grain-size, f: component 1 obtained from grain-size unmixing^[52], g: $S_{300\%}$. The “13 m” (left-black dashed line) represents the boundary between different sedimentary environments, corresponding to 4 201 aBP^[52]. The age at the bottom of the borehole (right-black dashed line) is 9 712 aBP^[52]. The orange pink and gray areas correspond to the fine and coarse particle components in the binary structure under fluvial deposition, respectively.

中与 χ 等参数变化相反, 说明碎屑来源的磁铁矿是 $SIRM/\chi$ 的主要贡献者。 $SIRM/\chi$ 高值对应平均粒径和粒度组分 1 高值。根据前期研究^[52], 粒度组分 1 为黄河或当地河流贡献的粗粒碎屑物质。因此, $SIRM/\chi$ 高值揭示的碎屑来源磁铁矿源自黄河或其他当地河流洪泛物质。在下部沉积物中, $SIRM/\chi$ 的整体数值明显低于上部, 说明不管是黄河还是当地河流贡献的碎屑磁铁矿显著降低。与此同时, 下部

沉积物中 χ 与 χ_{fd} 极好的相关性($R^2=0.97$), 说明主要的磁性贡献者为成壤磁铁矿, 证实下部沉积物中有更多陆源成壤物质的贡献。因此, 与上部沉积环境相比, 下部沉积环境几乎不再受河流洪泛过程的影响。 $S_{300\%}$ 反映亚铁磁性矿物的总体贡献, 其在上部沉积物中变化稳定且数值显著高于下部, 进一步揭示了两种截然不同的沉积环境。

磁性参数和其他环境指标的综合分析揭示了

古黄墩洼地自 9712 aBP 以来沉积环境发生了变化,从接收陆源碎屑沉积转变成河流洪泛物质沉积。沉积环境改变的节点为 13 m 处,即 4201 aBP^[52],说明黄墩地区从 4201 aBP 开始不断受到河流洪泛过程的影响,尤其是黄河的影响。这一时期与气候事件造成的黄河中游特大洪水出现的时间(4200 aBP)相吻合^[65]。也有研究认为这一转变时期与黄河演化由主要受气候控制转变为人类活动主导的过渡时期相一致^[66]。之后,在人类-环境相互作用过程中,人类活动的影响愈发显著^[67]。人口增加、农业扩张、社会经济发展造成黄河频繁决溢、改道^[68],自此黄墩洼地不断受到黄河下游洪泛的影响。

5 结论

(1) χ - T 曲线、磁滞回线、 $-dM/d$ 磁场曲线特征峰值、ZFC 及 ZFC 一阶曲线揭示在大野泽洪泛沉积物和黄河物质中主要磁性矿物类型为磁铁矿(遭受一定程度改造)并伴有少量高矫顽力矿物,而大汶河物质和莱泰山区碎屑岩石主要磁性矿物为磁铁矿。Day 氏图、Néel 图和 FORC 图结果显示大汶河物质和莱泰山区碎屑岩石的磁粒径相似,且远大于黄河物质和大野泽洪泛沉积物的磁粒径。IRM 分离结果显示黄河物质和大野泽洪泛沉积物具有相似的主要磁组分,而大汶河物质和莱泰山区碎屑岩石具有相似的主要磁组分。基于磁性矿物特征可以识别出大野泽典型洪泛层中主要物源为黄河泥沙,这为在黄河下游湖泊沉积物中提取黄河决溢、改道信息提供借鉴。

(2)有关 SIRM、 χ 、 χ_{fd} 、 $S_{100\%}$ 、 $S_{300\%}$ 及 HIRM 等参数的相关性分析显示黄河及古黄墩洼地上部样品各磁性参数分布模式相似,揭示黄墩洼地上部沉积物受到黄河洪泛过程的深刻影响。然而,黄墩洼地下部沉积物与黄河物质联系不大,但是极高的 χ_{fd} 与 χ 相关系数指示古黄墩洼地下部样品中磁性矿物深受成壤作用影响,反映了陆源碎屑沉积过程。磁学参数与粒度、TOC 等指标的对比分析,进一步证实了古黄墩洼地上下两部分沉积物形成于不同的沉积环境,这两种沉积环境转变大致出现在 4201 aBP。自 4201 aBP 后,苏北黄墩地区不断受到黄河下游洪泛的影响。基于磁性矿物特征的环境磁学参数对揭示黄河下游湖泊演化过程及追溯黄河下游河道变迁具有重要意义。

致谢: 江苏师范大学于世永教授和聊城大学

侯战方副教授在野外采样过程中提供指导和帮助,谨此感谢!

参考文献 (References)

- [1] Wang Y J, Su Y J. The geo - pattern of course shifts of the Lower Yellow River[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(6): 1019-1036.
- [2] Tan L C, Shen C C, Cai Y J, et al. Great flood in the middle-lower Yellow River reaches at 4000 a BP inferred from accurately-dated stalagmite records[J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(4): 206-208.
- [3] Chen Y Z, Syvitski J P M, Gao S, et al. Socio - economic impacts on flooding: a 4000 - year history of the Yellow River, China[J]. *AMBIO*, 2012, 41(7): 682-698.
- [4] Kidder T R, Zhuang Y J. Anthropocene archaeology of the Yellow River, China, 5000-2000 BP[J]. *The Holocene*, 2015, 25(10): 1627-1639.
- [5] Storozum M J, Qin Z, Ren X L, et al. The collapse of the North Song dynasty and the AD1048-1128 Yellow River floods: geoarchaeological evidence from northern Henan Province, China[J]. *The Holocene*, 2018, 28(11): 1759-1770.
- [6] 张振克, 王苏民, 沈吉, 等. 黄河下游南四湖地区黄河河道变迁的湖泊沉积响应[J]. *湖泊科学*, 1999, 11(3): 231-236. [ZHANG Zhenke, WANG Sumin, SHEN Ji, et al. River channel changes recorded by lake sediments in Nansihu Lake, the lower reaches of the Yellow River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, 11(3): 231-236.]
- [7] 陈诗越, 侯战方, 陈影影, 等. 黄河下游地区湖泊沉积与环境[M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2017: 1-173. [CHEN Shiyue, HOU Zhanfang, CHEN Yingying, et al. Sedimentation and Environment of Lakes in the Lower Yellow River Region[M]. Nanjing: Jiangsu Phoenix Science and Technology Press, 2017: 1-173.]
- [8] 吴艳宏, 沈吉, 夏威夷, 等. 南四湖 3000 年来南北沉积差异[J]. *地理学报*, 1999, 1(2): 78-83. [WU Yanhong, SHEN Ji, XIA Weilan, et al. Sedimentary difference between north and south Nansihu Lake, Shandong province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 1999, 1(2): 78-83.]
- [9] 侯战方, 陈诗越, 孟静静, 等. 近 1200 a 来黄河下游梁山泊沉积记录的环境变迁[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(1): 245-255. [HOU Zhanfang, CHEN Shiyue, MENG Jingjing, et al. Environmental changes in the lower reaches of Yellow River area during the last 1200 years revealed by multiple proxies from the Lake Liangshanpo[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1): 245-255.]
- [10] 魏本杰, 侯战方, 陈诗越, 等. 黄河下游大野泽沉积物粒度特征及其对环境演化的指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 151-161. [WEI Benjie, HOU Zhanfang, CHEN Shiyue, et al. Grain-size characteristics of Dayeze lake sediments in the lower reach of Yellow River and their environmental implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(3): 151-161.]
- [11] Chen Y Y, Chen S Y, Ma C M, et al. Palynological evidence of natural and anthropogenic impacts on aquatic environmental changes over the last 150 years in Dongping Lake, North China[J]. *Quaternary Interna-*

- tional, 2014, 349: 2-9.
- [12] 伏梦璇, 魏本杰, 衣雅男, 等. 黄河下游大野泽流域的侵蚀变化与气候演变[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(3): 8-16. [FU Mengxuan, WEI Benjie, YI Yanan, et al. Erosional changes and climatic evolution of the lake Dayeze in the lower Yellow River[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(3): 8-16.]
- [13] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [14] Zhang M, Xia J, Hong C. New challenges and opportunities for flood control in the Huai River: addressing a changing river - lake relationship[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2012, 26(1): 40-47.
- [15] Yu L S, Liu H B, Wan F, et al. Geochemical records of the sediments and their significance in Dongping Lake Area, the lower reach of Yellow River, North China[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(2): 140-151.
- [16] Hu S Y, Deng C L, Appel E, et al. Environmental magnetic studies of lacustrine sediments[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(7): 613-616.
- [17] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*[M]. Dordrecht: Springer, 1986: 1-220.
- [18] Maher B A. Palaeoclimatic records of the loess/palaeosol sequences of the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 154: 23-84.
- [19] Liu Q S, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: principles and applications[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): RG4002.
- [20] Orgeira M J, Egli R, Compagnucci R H. A quantitative model of magnetic enhancement in loessic soils[M]//Petrovský E, Ivers D, Harinarayana T, et al. *The Earth's Magnetic Interior*. Dordrecht: Springer, 2011: 361-397.
- [21] Liu Z F, Liu Q S, Torrent J, et al. Testing the magnetic proxy χ_{FD}/HIRM for quantifying paleoprecipitation in modern soil profiles from Shaanxi Province, China[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 368-378.
- [22] Nie J S, Song Y G, King J W, et al. Six million years of magnetic grain-size records reveal that temperature and precipitation were decoupled on the Chinese Loess Plateau during ~ 4.5-2.6 Ma[J]. *Quaternary Research*, 2013, 79(3): 465-470.
- [23] Hatfield R G, Stoner J S, Reilly B T, et al. Grain size dependent magnetic discrimination of Iceland and South Greenland terrestrial sediments in the northern North Atlantic sediment record[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 474: 474-489.
- [24] Liu Q S, Roberts A P, Torrent J, et al. What do the HIRM and S-ratio really measure in environmental magnetism?[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(9): Q09011.
- [25] Roberts A P, Zhao X, Heslop D, et al. Hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) quantification in sedimentary magnetism: limitations of existing proxies and ways forward[J]. *Geoscience Letters*, 2020, 7(1): 8.
- [26] Carter - Stiglitz B, Moskowitz B, Solheid P, et al. Low - temperature magnetic behavior of multidomain titanomagnetites: TM0, TM16, and TM35[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B12): B12S05.
- [27] Chang L, 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.
- [28] Egli R. Analysis of the field dependence of remanent magnetization curves[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B2): 2081.
- [29] Jackson M, Solheid P. On the quantitative analysis and evaluation of magnetic hysteresis data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(4): Q04Z15.
- [30] Dunlop D J. Theory and application of the Day plot (M_r/M_s versus H_c/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B3): 2056.
- [31] 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.]
- [32] Roberts A P, Heslop D, Zhao X, et al. Understanding fine magnetic particle systems through use of first-order reversal curve diagrams[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(4): 557-602.
- [33] Ilse S E, Groß F, Schütz G, et al. Understanding the interaction of soft and hard magnetic components in NdFeB with first-order reversal curves[J]. *Physical Review B*, 2021, 103(2): 024425.
- [34] Heslop D, Roberts A P. A method for unmixing magnetic hysteresis loops[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B3): B03103.
- [35] Heslop D. Numerical strategies for magnetic mineral unmixing[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 256-284.
- [36] Maxbauer D P, Feinberg J M, Fox D L. MAX UnMix: a web application for unmixing magnetic coercivity distributions[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 95: 140-145.
- [37] 白帆, 常燎, 薛鹏飞, 等. 等温剩磁曲线分解方法及其批量处理工具 BatchUnMix[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(12): 4789-4801. [BAI Fan, CHANG Liao, XUE Pengfei, et al. Decomposing isothermal remanent curves and development of a batch processing tool BatchUnMix[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(12): 4789-4801.]
- [38] Harrison R J, Muraszko J, Heslop D, et al. An improved algorithm for unmixing first-order reversal curve diagrams using principal component analysis[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(5): 1595-1610.
- [39] Roberts A P, Heslop D, Zhao X, et al. Unlocking information about fine magnetic particle assemblages from first-order reversal curve diagrams: recent advances[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 227: 103950.
- [40] Zhang R, Necula C, Heslop D, et al. Unmixing hysteresis loops of the late Miocene-early Pleistocene loess-red clay sequence[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 29515.
- [41] Bellon U D, Trindade R I F, Williams W. Unmixing of magnetic hysteresis loops through a modified gamma - Cauchy exponential model[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2023, 24(8):

- e2023GC011048.
- [42] Wu D, Zhou A F, Chen X M, et al. Hydrological and ecosystem response to abrupt changes in the Indian monsoon during the last glacial, as recorded by sediments from Xingyun Lake, Yunnan, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 421: 15-23.
- [43] Lisé-Pronovost A, St-Onge G, Gogorza C, et al. Rock-magnetic proxies of wind intensity and dust since 51, 200 cal BP from lacustrine sediments of Laguna Potrok Aike, southeastern Patagonia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 411: 72-86.
- [44] Zhong W, Wei Z Q, Shang S T, et al. A 15, 400-year record of environmental magnetic variations in sub-alpine lake sediments from the western Nanling Mountains in South China: implications for palaeoenvironmental changes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 82-92.
- [45] Fu H, Li M K, Bao K S, et al. Environment change recorded by lake sediment magnetism in the Songnen Plain, northeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 919: 170938.
- [46] 张汉洁. 黄河下游山东段古湖泽的变迁 [J]. 人民黄河, 1987(5): 67-69. [ZHANG Hanjie. Process of lakes along the lower Yellow River in ancient time[J]. *Yellow River*, 1987(5): 67-69.]
- [47] 喻宗仁, 窦素珍, 赵培才, 等. 山东东平湖的变迁与黄河改道的关系 [J]. *古地理学报*, 2004, 6(4): 469-479. [YU Zongren, DOU Suzhen, ZHAO Peicai, et al. Relationship between changes of Dongping Lake and shifting of the Yellow River in Shandong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(4): 469-479.]
- [48] 吕鸿燕, 祁德丽, 蒋雯, 等. 基于 4G 物联网卡的黄墩湖滞洪区远程视频监控系統应用探讨 [J]. *治淮*, 2019(3): 28-29. [LV Hongyan, QI Deli, JIANG Wen, et al. Discussion on the application of remote video monitoring system in Huangdun Lake flood detention area based on 4G IoT Card[J]. *Harnessing the Huaihe River*, 2019(3): 28-29.]
- [49] 杨迈里, 王云飞. 骆马湖的成因与演变 [J]. *湖泊科学*, 1989, 1(1): 37-44. [YANG Maili, WANG Yunfei. The origin and evolution of Luoma Lake[J]. *Scientia Limnologica Sinica*, 1989, 1(1): 37-44.]
- [50] Xue C T. Historical changes in the Yellow River delta, China[J]. *Marine Geology*, 1993, 113(3-4): 321-330.
- [51] 江苏省地方志编纂委员会. 江苏江河湖泊志 [M]. 南京: 江苏凤凰教育出版社, 2019. [Jiangsu Provincial Local Chronicles Compilation Committee. Records of Rivers and Lakes in Jiangsu[M]. Nanjing: Jiangsu Phoenix Education Publishing House, 2019.]
- [52] Zhang R, Xing L, Yu S Y, et al. Holocene overflow events of the lower Yellow River recorded in Huangdun ancient lake, northern Jiangsu Plain, China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2024, 39(3): 443-456.
- [53] Yu S Y, Colman S M, Li L X. BEMMA: a hierarchical Bayesian end-member modeling analysis of sediment grain-size distributions[J]. *Mathematical Geosciences*, 2016, 48(6): 723-741.
- [54] Roberts A P, Hu P X, Harrison R J, et al. Domain state diagnosis in rock magnetism: evaluation of potential alternatives to the day diagram[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(6): 5286-5314.
- [55] Tauxe L, Bertram H N, Seberino C. Physical interpretation of hysteresis loops: micromagnetic modeling of fine particle magnetite[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2002, 3(10): 1055.
- [56] Lascu I, Banerjee S K, Berquó T S. Quantifying the concentration of ferrimagnetic particles in sediments using rock magnetic methods[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(8): Q08Z19.
- [57] Egli R, Chen A P, Winklhofer M, et al. Detection of noninteracting single domain particles using first - order reversal curve diagrams[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(1): Q01Z11.
- [58] Spassov S, Heller F, Kretzschmar R, et al. Detrital and pedogenic magnetic mineral phases in the loess/palaeosol sequence at Lingtai (Central Chinese Loess Plateau)[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 140(4): 255-275.
- [59] Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves, 1. Unmixing natural sediments[J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2004, 48(2): 391-446.
- [60] Xue P F, Chang L, Pei Z W, et al. Discovery of giant magnetofossils within and outside of the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum in the North Atlantic[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 584: 117417.
- [61] Hartstra R L. Grain-size dependence of initial susceptibility and saturation magnetization -related parameters of four natural magnetites in the PSD-MD range[J]. *Geophysical Journal International*, 1982, 71(2): 477-495.
- [62] Franco V, Dodrill B. Magnetic Measurement Techniques for Materials Characterization[M]. Cham: Springer, 2021: 1-805.
- [63] Smirnov A V. Low-temperature magnetic properties of magnetite using first-order reversal curve analysis: implications for the pseudo-single-domain state[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(11): Q11011.
- [64] Peters C, Dekkers M J. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, 28(16-19): 659-667.
- [65] Huang C C, Pang J L, Zha X C, et al. Extraordinary floods related to the climatic event at 4200 a BP on the Qishuihe River, middle reaches of the Yellow River, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(3-4): 460-468.
- [66] Yu S Y, Li W J, Zhou L, et al. Human disturbances dominated the unprecedentedly high frequency of Yellow River flood over the last millennium[J]. *Science Advances*, 2023, 9(8): eadf8576.
- [67] Xie L Y, Daudjee Z, Liu C F, et al. Settlement relocation, urban construction, and social transformation in China's central plain, 2300-1500 B. C.[J]. *Asian Perspectives*, 2020, 59(2): 299-329.
- [68] Chen Y Z. Flood dynamics of the lower Yellow River over the last 3000 years: characteristics and implications for geoarchaeology[J]. *Quaternary International*, 2019, 521: 147-157.