

引用格式: 张俊辉, 张鹤, 武佳坤, 等. 2026. 秦岭北麓霸王河沉积物磁性特征及其变化机制[J]. 沉积学报. doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.021  
ZHANG JunHui, ZHANG Ge, WU JiaKun, et al. 2026. Study on Magnetic Characteristics and Variation Mechanisms of Sediments in the Bawang River in the Northern Foot of the Qinling Mountains [J]. Acta Sedimentologica Sinica, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.021.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.021

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.021

# 秦岭北麓霸王河沉积物磁性特征及其变化机制研究

张俊辉<sup>1,2</sup>, 张鹤<sup>1</sup>, 武佳坤<sup>1,2</sup>, 王鹏<sup>1</sup>, 刘军恒<sup>1</sup>, 杨伟东<sup>1,2</sup>, 吴博闻<sup>1</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>, 郝亮亮<sup>1</sup>, 苗乐缤<sup>1</sup>, 荆泽赞<sup>1</sup>

1. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西宝鸡 721000

2. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西宝鸡 721013

**摘要** 【目的】秦岭北麓地处我国南北地貌单元的过渡地带, 是衔接黄土高原与秦岭造山带的关键区域。在该区域开展河流沉积物磁性特征研究, 对理解区域环境演化过程与沉积响应机制、探讨流域环境变化规律具有重要的科学价值和理论意义。【方法】以秦岭北麓霸王河下游河漫滩沉积剖面作为研究对象, 通过系统的环境磁学分析, 结合主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA), 探讨了不同沉积阶段的磁性特征和主导机制。【结果】剖面沉积特征以 124 cm 处为界呈显著分异, 且磁性整体偏弱。剖面下部阶段 I (308~124 cm) 沉积物磁性较弱, 磁性矿物主要包含赤铁矿、菱铁矿以及少量磁铁矿; 磁性矿物粒径向下逐渐粗化至多畴 (Multi-Domain, MD) 颗粒。阶段 II (124~24 cm) 沉积物磁性显著增强, 以小颗粒的假单畴 (Pseudo-Single Domain, PSD) 磁铁矿、磁赤铁矿为主, 同时含有少量赤铁矿。PCA 结果进一步证实了剖面的分层特征: 亚铁磁性矿物含量与磁性颗粒粒径两大主成分累计贡献率高达 89%; 亚铁磁性矿物磁铁矿含量变化是剖面不同沉积阶段磁性差异的主导因素。【结论】阶段 I 沉积物长期处于水下还原环境, 使得大量磁铁矿在早期成岩作用影响下被溶解; 阶段 II 沉积物处于氧化环境中, 磁性特征受到水动力分选和弱成壤作用共同影响。该研究深化了对沉积物成岩作用影响因素的认识, 为解析沉积环境变化与渭河流域气候环境变化的特征提供重要参考资料。

**关键词** 秦岭北麓; 河流沉积物; 环境磁学; 成岩作用

**第一作者** 张俊辉, 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 环境演变与人类文明、环境磁学与人类活动, E-mail: bwlzjh@126.com

中图分类号: P532 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550 (2026) XX-0000-0000

## 0 引言

气候变化直接影响人类生产生活与生态环境稳定, 其长期变化信息可通过不同类型沉积物得以保存 (李文等, 2021; 刘德政和夏非, 2021; 陈渠等, 2022; 周鸣亮等, 2023)。沉积物作为关键的环境信息载体主要来自周缘山地和基岩的风化剥蚀产物 (傅寒晶等, 2021)。风化剥蚀物质经流水或风力搬运至沉积区后, 可能经历不同程度的次生作用, 最终形成可供研究的磁性矿物综合体 (王晓雪等, 2018)。通过分析沉积物中磁性矿物的含量、粒径和矿物种类等特征, 可获取沉积物来源、运输及沉积后次生作用的信号, 进而可间接反映气候和人类活动的信息 (Thompson and Oldfield, 1986; 肖春风等, 2023; 贺辰戈等, 2024; 马兆

收稿日期: 2025-12-22; 收修改稿日期: 2026-05-04

基金项目: 陕西省高校青年创新团队 (2022JP093)

颖等, 2024; Zhang *et al.*, 2025)。已有研究显示, 相较于风力搬运沉积物(如黄土), 流水搬运沉积物(如河湖相、海陆交互相与深海相沉积物)的磁学特征控制因素更为复杂。例如, 在珠江三角洲, 全新世沉积岩心的环境磁学参数被认为与区域陆海过渡的阶段性演变过程密切相关(Zhang *et al.*, 2026); 中国南海沉积物的环境磁学信号体现了对海平面变化、流域风化强度、陆源碎屑输入及全球气候演化的综合响应(Xue *et al.*, 2025)。大量研究表明, 水成沉积物的磁学特征可能受到自然成岩、生物扰动与构造活动等多种因素的影响, 对其变化机制的研究已逐渐成为学界关注的重点(朱筱敏等, 2019)。在珠江三角洲等地开展的磁学研究认为, 还原环境中细颗粒磁铁矿优先被溶解; 此后, 粗的单畴、多畴颗粒继续还原, 并导致磁铁矿粒径发生变化(成沁梓等, 2020; 吉俊熹等, 2022; Zhang *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2023; Guan *et al.*, 2024)。在对武义江流域沉积物研究中, 利用磁学与地球化学手段对沉积物的研究指示, 还原环境下细粒磁铁矿会发生选择性溶解, 进而导致磁学参数显著降低(张曼, 2015)。研究者对北京北安河沉积物不同沉积深度的磁学参数开展研究, 探讨了早期成岩作用与磁性矿物组合变化的关联, 认为成岩作用强度会随沉积环境变化(王红强等, 2008)。此外, 对岷江上游干流边滩沉积物不同河段的磁性参数与粒度组成开展的研究发现, 水动力分选会影响磁性矿物迁移富集, 同时物质来源差异对磁性特征空间分布具有调控作用, 提出了该区域磁性特征的空间分异机制(褚慧敏等, 2016; Badesab *et al.*, 2023)。研究者通过追踪红河沉积物从源头至沉积区的搬运过程, 量化了水动力分选与物质来源对磁性参数的贡献比例(Nguyen *et al.*, 2016)。另外, 对东太平洋沉积物的研究还认为, 生物成因的趋磁细菌在还原环境中相对碎屑磁铁矿更稳定, 其与多畴磁铁矿的比值可作为氧化还原条件的定量指标(Liu *et al.*, 2024)。对鹤庆湖相岩心的研究认为, 季节性水位变化引发的氧化还原交替会使磁性矿物经历“溶解—再沉积”循环, 进而形成不规则磁性层理(徐新文等, 2012)。上述研究表明, 水成环境中成岩作用可能破坏了沉积物磁性矿物所记录的原生古气候信息, 导致磁学参数不能被简单运用到环境变化研究中。因此, 通过水成沉积物磁学特征反映古气候环境变化时, 须深入厘清其磁性变化机制(李文等, 2021; Wang *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2025)。

秦岭横亘于我国南北地理分界线, 秦岭北麓是黄土高原与秦岭造山带间重要的物质交换区, 同时该区域又受南北气候的影响, 这一特殊的地貌与气候区位, 使得该区域沉积物对环境变化有更加直接的响应。因此, 本文选取了秦岭北麓的霸王河河漫滩剖面作为研究对象。作为开放的水成沉积系统, 霸王河河漫滩沉积物在周期性出露与淹没过程中形成的磁性变化, 能精准反映区域环境演变与磁性矿物转化机制。同时, 研究区处于我国南北过渡带, 具备显

著的位置优势，可为理解水成沉积物在干湿交替环境下的磁学响应提供区域案例。该研究通过对霸王河剖面（BWH剖面）沉积物进行全面系统的磁学实验，分析沉积物中磁性矿物组合的变化规律，探讨早期成岩作用对磁性矿物的改造，揭示沉积环境与成岩作用的内在联系，进一步推动环境磁学在开放沉积系统古环境研究中的应用。

## 1 研究区域及方法

### 1.1 研究区概况

#### 1.1.1 地理位置与自然条件

霸王河发源于秦岭主峰太白山北麓（图 1a），流域沉积物主要来源于太白山花岗岩、片麻岩，以及少量绿泥石、石榴子石、透辉石等风化碎屑物质，河流主河道自南向北流经宝鸡市眉县，最终汇入渭河，全流域面积 177.12 km<sup>2</sup>，干流长 43.6 km（左其亭，2021）。红河谷位于眉县西南部，属太白山北麓次级流域，河谷内发育了红色片麻岩带和鸚鹄咀—红河火山杂岩带（李海平等，2001），谷水自东南向西北汇入霸王河中游。秦岭的地质构造对霸王河的地貌特征产生了重要影响，河流的上游为山地，地势较为陡峭，中下游地势逐渐平缓，形成冲积平原。在峪口以上，均为林山区，植被良好，水流清澈，峪口以下为砂卵石河床，但冲刷较小。

霸王河流域年均温 12.9 °C，年平均降水 609.5 mm，降水集中在夏季，春秋两季相对干旱，导致夏季多洪水，冬季为枯水期。作为渭河南岸重要支流，霸王河与渭河水文联系密切，霸王河的水量补给在一定程度上影响了渭河流域的水资源状况，尤其是在降水丰富的夏季，霸王河会带入大量的泥沙和营养物质，对下游的生态环境有重要影响。

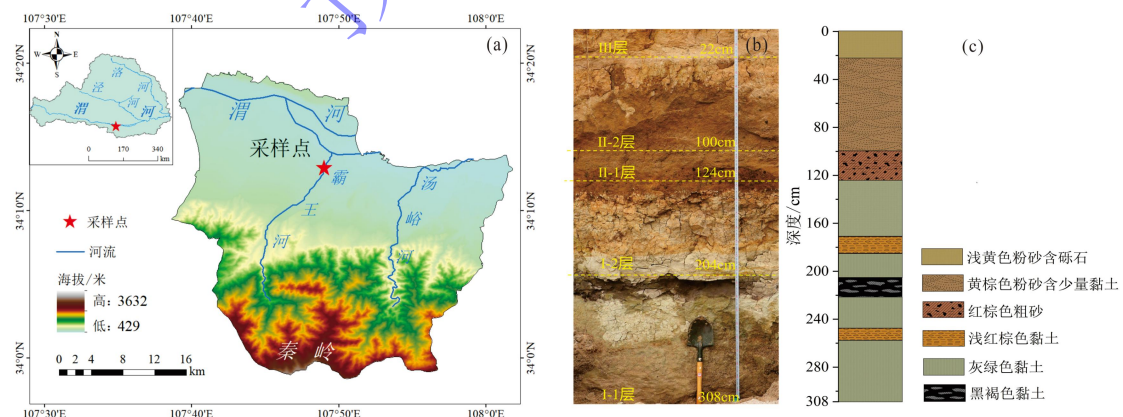


图 1 霸王河流域与采样点分布示意图 (a)、采样剖面图 (b) 及剖面岩性图 (c)

Fig.1 Distribution of the sampling sites of the Bawang River basin (a), sampling profile (b), and lithological profile (c)

#### 1.1.2 剖面岩性

BWH 剖面 (107°49'01.39" E, 34°12'56.63" N), 位于宝鸡市眉县霸王河西岸, 为河漫滩沉积物, 整个剖面出露厚度为 295 cm, 主要由较粗的砂砾和较细的黏土交替构成, 呈水平层理发育 (图 1b、c)。根据岩性和磁性特征的垂向变化, 自下而上将 BWH 剖面沉积分为五层。

I-1 层: (308~204 cm) 其中 308~258 cm 灰绿色黏土含少量粉砂, 258~249 cm 为浅红棕色黏土; 249~222 cm 为灰绿色黏土; 222~204 cm 为黑褐色黏土。

I-2 层: (204~124 cm) 其中 204~182 cm 为浅绿色黏土, 从 182~170 cm 出现浅红棕色黏土, 170~124 cm 为浅绿色黏土。

II-1 层: (124~100 cm) 为红棕色粗砂。

II-2 层: (100~22 cm) 为黄棕色粉砂夹杂少量红棕色黏土层, 并发现植物根系。

III层: (22~0 cm) 浅黄色粉砂夹杂砾石层, 含植物根系。

## 1.2 样品采集与研究方法

### 1.2.1 环境磁学方法

BWH 剖面深 308 cm, 以 2 cm 为间隔进行采样, 采样过程中发现, 剖面顶部 0~22 cm 为浅黄色粉砂含砾石, 存在明显的人为挖掘破坏痕迹, 受人类活动扰动显著, 且该段样品磁学参数异常偏高, 不能代表区域沉积环境自然属性, 故在具体研究中未分析。因此, 后续的实验分析与图表展示均以 22~308 cm 深度的沉积物为主, 以保证结果的可靠性与可比性 (实验数据详见 Science DB 数据集: 张俊辉, 2026)。将采集的 154 个样品带回实验室后在 40 °C 烘箱中烘干, 用研钵研磨后取约 5.5 g 样品, 用塑料薄膜包紧后装入无磁立方塑料盒中进行环境磁学参数测试 (Thompson and Oldfield, 1986)。使用英国 Bartington 公司生产的 MS2B 型磁化率仪器获得样品的质量磁化率 ( $\chi_{if}$ ); 通过 ACSD-2000T 型交变退磁仪和 AGICO 公司的 JR-6A 双速自动旋转磁力仪测量样品的非磁滞剩磁 (ARM), 公式计算后得到非磁滞剩磁磁化率 ( $\chi_{ARM}$ ); 采用 ASCIM-10-30 脉冲磁化仪给样品依次施加正向 300 mT、1 T 和反向 20 mT、100 mT、300 mT 场强, 并使用 AGICO 公司生产的 JR-6A 双速自动旋转磁化仪获得不同场强下样品的等温剩磁 (IRM), 当外加磁场为 1T 时获得的等温剩磁为饱和等温剩磁 (SIRM)。根据公式计算 S-ratio=IRM<sub>-300mT</sub>/SIRM、硬剩磁 (HIRM=(SIRM+IRM<sub>-300mT</sub>)/2)、软剩磁 (SOFT=(SIRM-IRM<sub>-20mT</sub>)/2)、非磁滞剩磁磁化率与饱和等温剩磁的比值 ( $\chi_{ARM}/SIRM$ )、非磁滞剩磁磁化率与低频磁化率的比值 ( $\chi_{ARM}/\chi_{if}$ ) 等磁学参数 (Thompson and Oldfield, 1986)。为进一步确定样品磁性特征, 选取代表性样品进行磁滞回线 (Loop)、一阶反转曲线 (FORC)、热磁曲线 ( $\kappa$ -T 曲线) 测量。使用美国 LakeShore 公司的 VSM3902

型变梯度磁力仪得到样品的磁滞参数和 FORC 图 (SF=6)；通过捷克公司生产的 AGIGOMFK1FA 型卡帕桥多频磁化率仪获得  $\kappa$ -T 曲线。以上测试在宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室完成。

### 1.2.2 主成分分析法

主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA) 是对数据进行降维处理的一种常用方法, 可对多指标参数进行综合评价, 它能够通过提取事物的主要特性, 简化问题处理过程, 并将样品数据标准化从客观的角度进行描述 (Zeinalzadeh and Rezaei, 2017)。在河流沉积研究中, 不同沉积层样品的磁性特征主要受磁性矿物的含量、种类和粒径三方面因素的影响, 同时系统的环境磁学方法会得出多个具有重叠指示意义的参数, 并且不同参数指标的单位不一致无法进行对比分析。因此为了进一步提取影响不同沉积层样品磁性特征差异的因素, 利用 PCA 对 154 个沉积物样品的磁学参数结果进行定量化分析。

## 2 结果分析

### 2.1 BWH 剖面沉积物的磁性矿物含量

磁化率 ( $\chi_{lf}$ ) 是衡量物质被磁化难易程度的指标, 其变化受磁性矿物的种类、粒径与含量共同影响 (安芷生等, 2006; 邓成龙等, 2007)。BWH 剖面  $\chi_{lf}$  平均值为  $10.04 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 变化范围是  $6.28 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \sim 21.54 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 整体磁性偏低, 载磁矿物含量偏少。 $\chi_{ARM}$ 、SIRM 的同步低值特征, 表明剖面亚铁磁性矿物 (尤其是细粒磁铁矿) 含量较低 (图 2a~c)。其中 I 层沉积物磁化率为相对稳定的低值, 且  $\chi_{ARM}$ 、SIRM 同步降低, 指示该层亚铁磁性矿物含量显著偏低; 相比之下, II 层沉积物磁化率值较高, 剖面最大磁化率值出现在该层, 且  $\chi_{ARM}$ 、SIRM 同步升高, 表明这一沉积层亚铁磁性矿物的浓度相对较高。非磁滞剩磁磁化率 ( $\chi_{ARM}$ ) 是对稳定单畴 (SSD) 亚铁磁性矿物颗粒极为敏感的参数 (邓成龙等, 2007)。BWH 剖面  $\chi_{ARM}$  值较低, 均值为  $14.57 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 说明单畴 (SD) 颗粒平均含量较少, I 层沉积物 SD 颗粒含量更少, 相比 II 层沉积物中 SD 颗粒的含量较高且波动较大 (图 2b)。饱和等温剩磁 (SIRM) 反映样品中亚铁磁性矿物的含量变化, 但通常不受顺磁性和抗磁性矿物的影响 (罗超等, 2013)。BWH 剖面 SIRM 均值为  $60.06 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , SIRM 随剖面深度变化趋势与  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$  较为相近, I 层 SIRM 值较低, 且在 204 cm 处 SIRM 随剖面变深而减小的趋势更大, 指示在 I 层中顺磁性物质对磁化率有很大贡献。II 层 SIRM 值较高且剖面最大值  $219.44 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  出现在 II-1 层 (图 2c)。

SOFT 和 HIRM 分别指示样品中软磁性和硬磁性矿物的含量 (Maher, 1988)。BWH 剖

面I层 SOFT 均值为  $3.46 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，明显低于II层 SOFT 均值为  $20.62 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，说明I层软磁性矿物含量明显减少（图 2d）。BWH 剖面 HIRM 值变化范围是  $0.30 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \sim 31.92 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，表明 HIRM 在不同沉积层波动较大，说明各层中高矫顽力磁性矿物对剩磁的贡献存在差异。尤其在I-2 层中 HIRM 值与其他参数相比增加幅度明显，说明I层硬磁性矿物含量相对较高（图 2e）。S-ratio 值可衡量样品中低矫顽力亚铁磁性矿物和高矫顽力不完全反铁磁性矿物的相对含量（邓成龙等，2007）。BWH 剖面 S-ratio 在不同层段波动明显，I-2 层 S-ratio 迅速减小，该层平均值为 0.45，说明在I-2 层高矫顽力的磁性矿物组分相对增加（图 2f）。

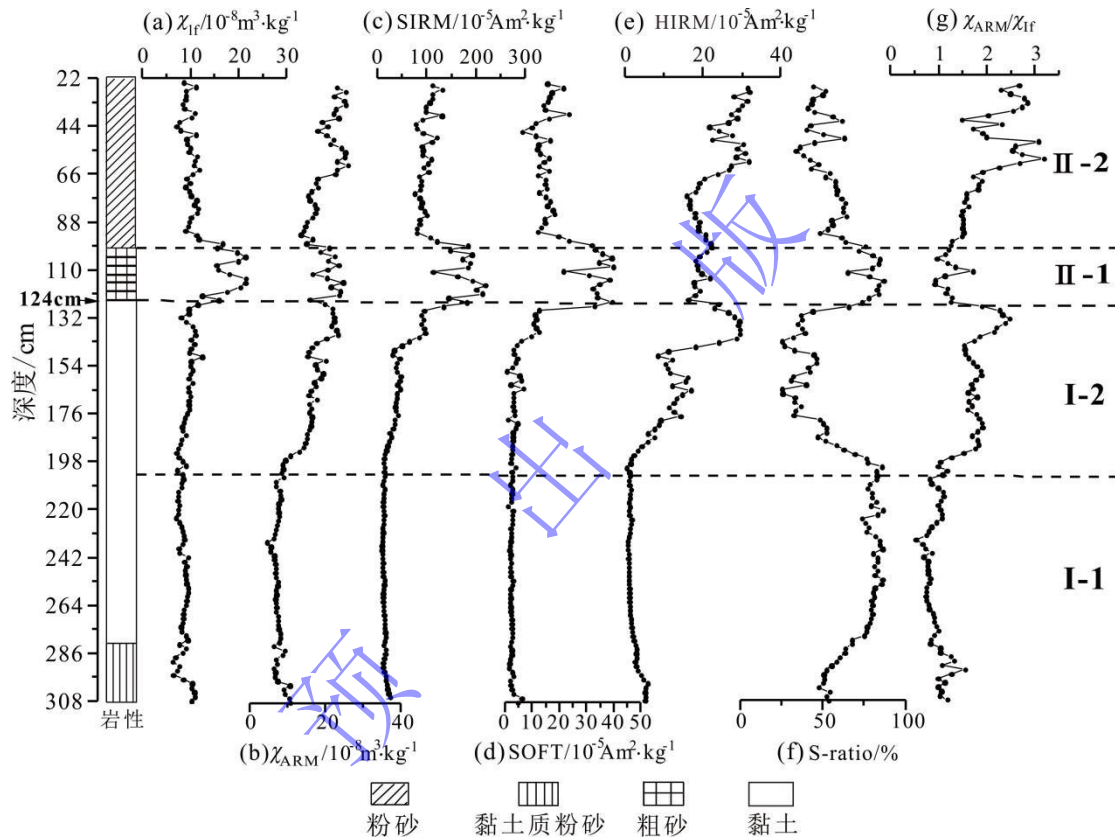


图 2 环境磁学参数随剖面深度变化趋势图

0~22 cm 样品受人类活动扰动明显，磁学参数异常偏高，为避免掩盖 22~308 cm 沉积物的磁性变化趋势，本图未展示该段数据

Fig.2 Environmental magnetic parameters variation trend with depth

Samples between 0-22 cm show significant disturbance from human activities, resulting in abnormally high magnetic parameters. To avoid masking the magnetic variation trends of sediments in the 22-308 cm layer, this figure does not display data from that range

$\chi_{\text{ARM}}$  对单畴颗粒敏感，所以可利用  $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{IF}}$  判断单畴颗粒的相对含量。一般  $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{IF}}$  的值越大则指示磁性矿物颗粒越细 (Maher, 1988)。BWH 剖面沉积物的  $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{IF}}$  平均值为 1.47，表明剖面磁性矿物粒径整体偏粗 (图 2g)。I层  $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{IF}}$  平均值为 1.27，II层  $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{IF}}$  平均值为 1.82，表明II层相比I层细颗粒磁性矿物含量更高。并且I层沉积物随剖面深度加深，细颗粒亚铁磁性矿物含量逐渐下降，指示磁性矿物粒度逐渐变粗。

## 2.2 BWH 剖面沉积物的磁性矿物种类

磁滞性质是铁磁性矿物和亚铁磁性矿物的一个重要特征，依据磁滞回线（Loop）的形态特征和相关磁滞参数，可获取磁性矿物种类和含量的信息（Thompson and Oldfield, 1986）。磁滞回线测量的最大磁场强度为 1T，测定饱和磁化强度（ $M_s$ ）、饱和剩余磁化强度（ $M_{rs}$ ）、矫顽力（ $B_c$ ）和剩磁矫顽力（ $B_{cr}$ ）。I-1 层代表性样品（图 3a, b）的  $B_c$  为 7.6 mT、5.95 mT， $B_{cr}$  为 58.3 mT、43.1 mT， $M_{rs}/M_s$  为 0.12、0.01，磁滞参数值都偏小；S-ratio 值分别为 0.81、0.63，磁滞回线呈细腰型，且矫正前磁滞回线为一条过一三象限的直线，磁滞形态表现出顺磁性特征（董靛雯等，2018），说明亚铁磁性矿物为 I-1 层样品的主要载磁矿物，同时该层含有大量顺磁性矿物。I-2 层代表性样品磁性很弱，难被磁化， $B_c$  和  $B_{cr}$  值明显变大， $B_c$  为 26.28 mT、22.41 mT， $B_{cr}$  为 117.4 mT、121.9 mT， $M_{rs}/M_s$  为 0.27、0.24，磁滞参数值明显增大；磁滞回线较为宽、胖（图 3c, d），指示 I-2 层样品中不完全反铁磁性矿物相对含量增加。II 层沉积物代表性样品， $B_c$  和  $B_{cr}$  略高， $B_c$  为 12.09 mT、14.91 mT， $B_{cr}$  为 66.13 mT、77.01 mT， $M_{rs}/M_s$  值变小为 0.17、0.11，磁滞回线呈现细腰型（图 3e, f），但是样品在外加场 500 mT 时仍未闭合，说明 II 层样品以磁铁矿为主同时含有不完全反铁磁性矿物。

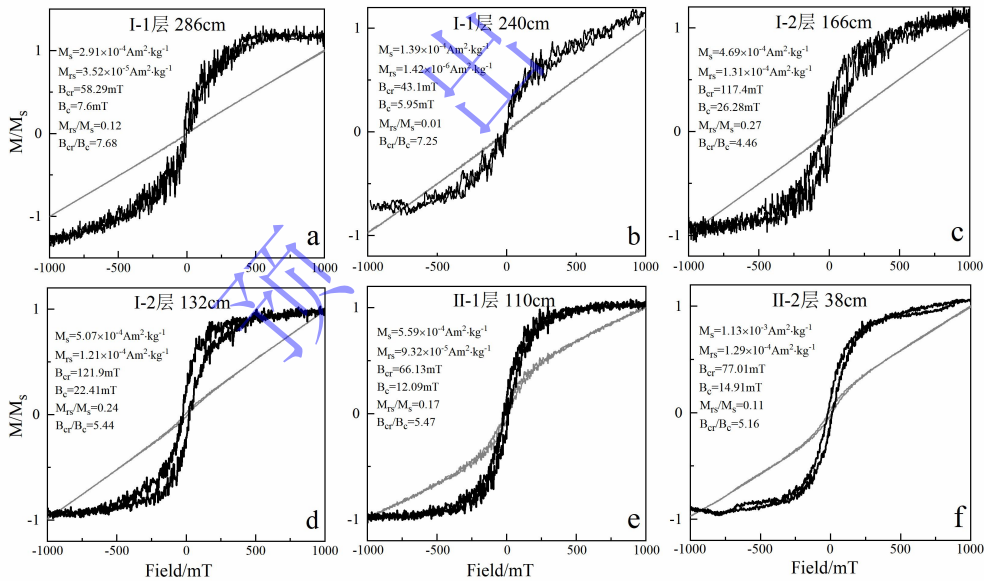


图 3 BWH 代表性样品 Loop 图

黑色为顺磁矫正后；M 为磁化强度， $M_s$  为饱和磁化强度

Fig.3 Magnetic hysteresis loops of typical samples from the BWH profile

The black lines are hysteresis loops after paramagnetic correction; M=magnetization;  $M_s$ =saturated magnetization

根据不同磁性矿物的居里温度不同以及矿物在加热过程中磁性会随着温度变化而变化的特点，利用热磁曲线（ $\kappa$ -T）可有效识别磁性矿物的类型及其在加热过程中的转化规律（Thompson and Oldfield, 1986）。I-1 层样品（240 cm）加热至 700 °C 过程中磁化率逐步下

降, 且加热曲线、冷却曲线基本可逆(图 4b), 表明磁性矿物较单纯, 加热过程中未发生明显的矿物转化, 热稳定性强。前文研究发现 240 cm 处样品 S-ratio 值为 83.34% (图 2f), 说明该样品亚铁磁性矿物磁铁矿的相对含量较高, 而 $\chi_{ARM}/\chi_{lf}$  值较小指示样品中磁性矿物粒径较粗(图 2g), 因此 240 cm 样品可能以热稳定性强的多畴磁铁矿为主。I-1 层 286 cm 处样品加热曲线持续缓慢下降, 指示顺磁性矿物存在, 且冷却曲线显著高于加热曲线指示新磁性矿物生成, 同时冷却曲线显示出 580 °C 的居里点, 可能指示顺磁性矿物转化为磁铁矿(图 4a), 以上分析表明 I-1 层沉积物磁性矿物为顺磁性矿物和磁铁矿(Dunlop *et al.*, 1998; Passier *et al.*, 2001; Ferrow and Sjöberg, 2005)。通过对 I-2 层 132 cm 和 166 cm 样品进行分步加热实验(图 5), 能进一步反映出不同加热温度下矿物的磁性变化, 实验结果发现两个样品加热曲线在室温到 300 °C 间缓慢下降(图 5a, f), 反映出顺磁性矿物存在(赵雨阳, 2023; 谌微微等, 2024)。温度升至 350 °C~420 °C 区间时, 矿物发生快速氧化反应, 形成大量强磁性矿物(如磁铁矿、磁黄铁矿), 致使磁化率急剧升高(图 5c, h)。温度超过 500 °C 后, 磁铁矿逐渐转化为磁赤铁矿与赤铁矿, 磁化率随之明显下降, 上述热磁曲线特征与菱铁矿受热分解的典型过程高度一致(潘永信等, 1998, 1999; Badejo *et al.*, 2021; Muxworthy *et al.*, 2023)。由于样品冷却曲线未表现出在 320 °C 的特征居里点, 表明黄铁矿不是主要的磁性矿物, 可能以微量形式存在(王磊等, 2008; Muxworthy *et al.*, 2023)。结合热磁特征与前文磁学参数综合分析, I-2 层沉积物 S-ratio 极低(132 cm: 37.4%; 166 cm: 25.77%), 同时  $B_c$  值最高达 26.28 mT, 指示沉积物中硬磁性矿物赤铁矿相对含量较高。由此可知该 I-2 层样品中主要存在菱铁矿、赤铁矿。II 层代表性样品(110 cm、38 cm)磁化率相对较高, 磁性较强。热磁曲线总体上都显示出不可逆的形态(图 4e, f), 且冷却曲线都位于加热曲线上方, 表明在加热过程中产生了新的强磁性矿物(Basavaiah *et al.*, 2015)。在加热过程中样品磁化强度在 300 °C~450 °C 波动下降是由于磁赤铁矿受热转化为赤铁矿造成的(邓成龙等, 2007)。继续加热到 580 °C 左右磁化率突然大幅降低, 表现出磁铁矿的特征, 继续加热到 680 °C, 磁化强度逐步降低到 0, 指示赤铁矿的存在(Dunlop *et al.*, 1998)。上述分析表明 II 层沉积物载磁矿物以磁铁矿和磁赤铁矿为主, 同时含有少量赤铁矿。

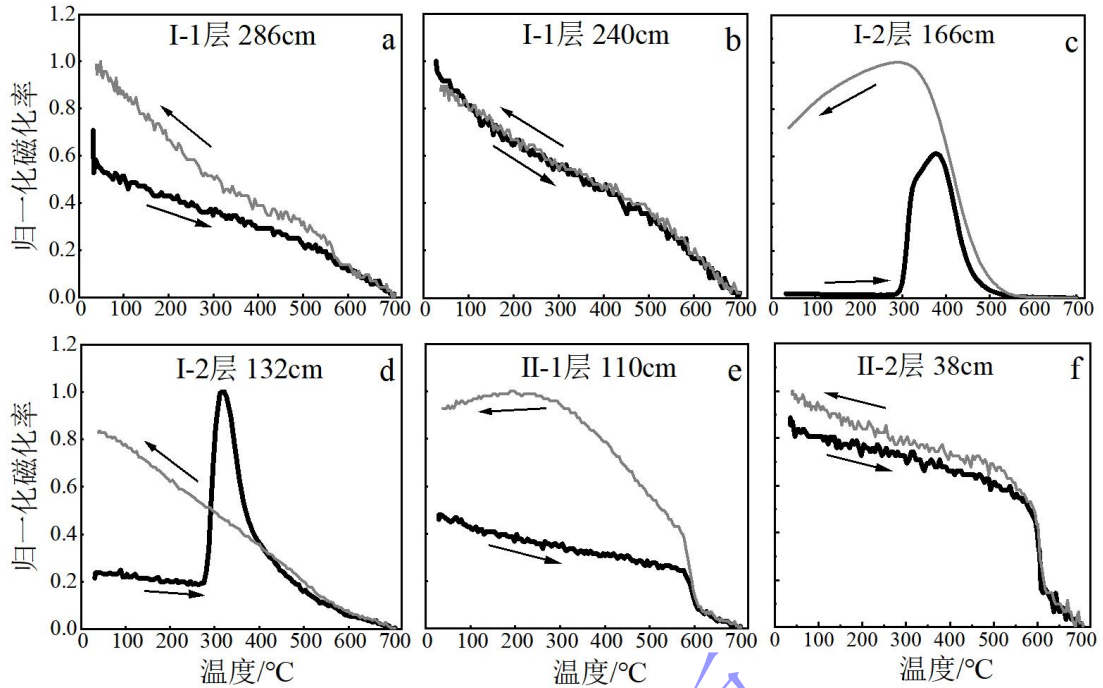


图4 BWH 代表性样品的 $\kappa$ -T 曲线

黑色为加热曲线，灰色为冷却曲线

Fig.4  $\kappa$ -T curves of typical samples from the BWH profile

The black and gray lines represent heating and cooling curves

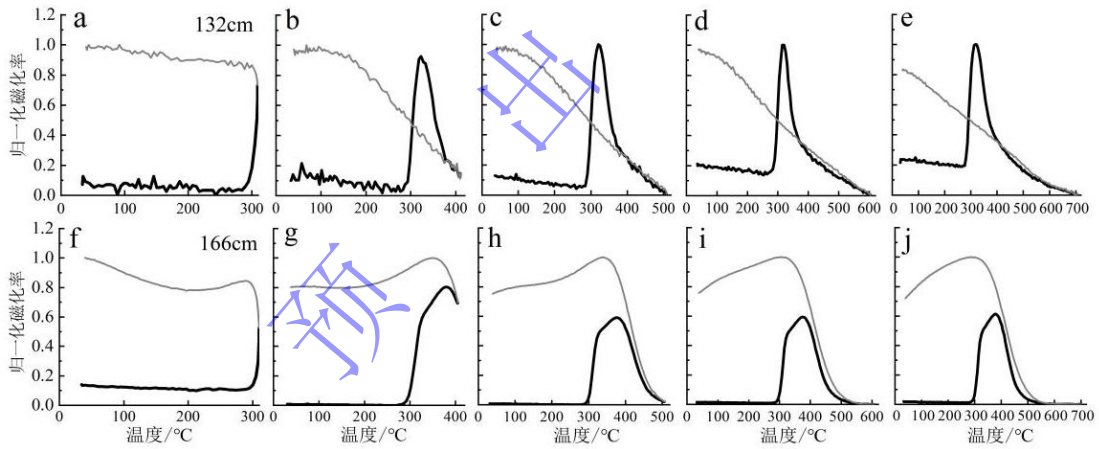


图5 BWH 剖面 132 cm、166 cm 样品逐步加热 $\kappa$ -T 实验结果归一化

黑色为加热曲线，灰色为冷却曲线

Fig.5  $\kappa$ -T curves of typical samples from the BWH profile

The black and gray lines represent heating and cooling curves

### 2.3 BWH 剖面沉积物的磁性矿物粒径

研究表明， $\chi_{ARM}/\chi_{IF}$  可指示样品中亚铁磁性矿物的粒径 (King *et al.*, 1982)。在以  $\chi_{IF}$  为横坐标， $\chi_{ARM}$  为纵坐标的 King 图上 (图 6)：I 层沉积物样品的分布表现出从  $5 \mu\text{m}$  到  $25 \mu\text{m}$  的变化趋势，表明 I 层沉积物磁性矿物粒径随深度变深逐渐变粗。II 层沉积物投影分布相对集中，样品大介于  $1.0\sim 5.0 \mu\text{m}$ ，磁性矿物粒径比 I 层沉积物细。

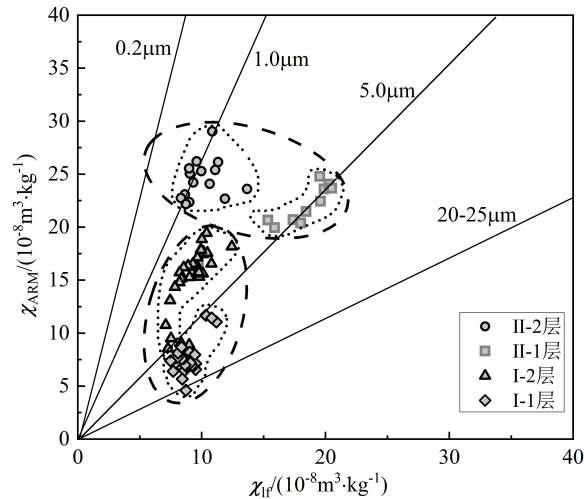


图6 BWH剖面不同沉积层样品 King 图

Fig.6 King diagram of samples from different sedimentary layers at the BWH profile

FORC 图谱可以方便地鉴定样品中磁性矿物的磁畴状态，横轴 ( $H_c$ ) 指示磁性矿物矫顽力的大小，纵轴 ( $H_u$ ) 表示磁性颗粒的相互作用 (Roberts *et al.*, 2000)，而 Day 图可以反映磁性矿物的畴态信息 (Roberts *et al.*, 2018)。BWH 剖面 286 cm、240 cm 处样品在 FORC 图中 (图 7)  $H_u/T$  和  $H_c/T$  分布宽，等值线分散，磁相互作用特征显著；样品在 Day 图 (图 7) 中的投影点靠近 MD 区域 ( $M_{rs}/M_s$  均值为 0.065,  $B_{cr}/B_c$  均值为 7.46)，指示磁性矿物以多畴 (MD) 颗粒为主，矫顽力低且分布广，粒径达到剖面最粗。166 cm、132 cm 处样品的 FORC 图  $H_u/T$  范围较大， $H_c/T$  分布较宽，等值线分散；样品在 Day 图中的投影点逐渐远离 MD 区域 ( $M_{rs}/M_s$  均值为 0.26,  $B_{cr}/B_c$  均值为 4.95) 指示磁颗粒间相互作用力减弱，磁颗粒为较粗 PSD 颗粒 (Dunlop *et al.*, 2002)。110 cm、38 cm 处样品 FORC 图  $H_u/T$  范围变窄， $H_c/T$  分布相对集中，等值线峰值明显且较紧凑；样品在 Day 图中均位于 PSD 区域 ( $M_{rs}/M_s$  均值为 0.14,  $B_{cr}/B_c$  均值为 5.32)，说明磁性矿物间相互作用力较弱，磁性颗粒较细。综合分析发现，BWH 剖面沉积物磁性矿物粒径随深度渐浅呈现由粗变细的趋势。

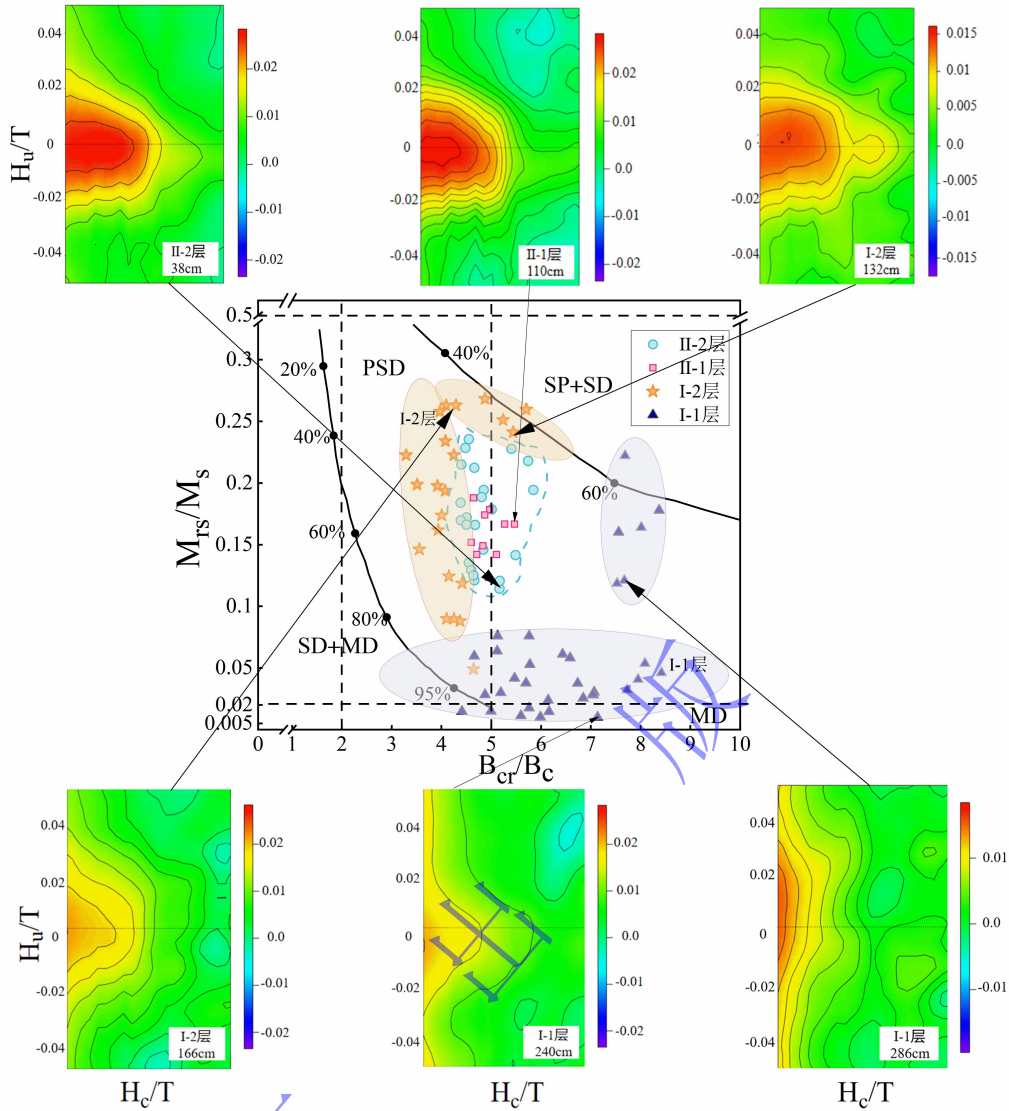


图7 BWH 剖面不同层沉积物代表性样品 FORC 图和 DAY 图 (FORC 图 SF=6)

Fig.7 Representative samples of the BWH profile sediments at different stratigraphic levels show FORC and DAY diagrams (FORC graph smoothing factor is 6)

### 3 讨论

#### 3.1 BWH 沉积物矿物组合变化及定量化分析

BWH 剖面沉积物磁学研究结果显示, 剖面整体磁性偏弱, 磁性矿物由磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿和菱铁矿组成, 磁性矿物种类较多且在不同层位有较大组合变化, 磁性矿物粒径呈现出随剖面深度变深逐渐变粗的规律。I-1 层沉积物 S-ratio 值最大, 磁性矿物以多畴 (MD) 磁铁矿为主。I-2 层沉积物 S-ratio 值明显减小,  $B_{cr}$  均值增大至 111.9 mT, 磁滞回线呈明显粗腰形态, 共同指示高矫顽力赤铁矿等不完全反铁磁性矿物相对含量增加, 而磁铁矿含量相对减少, 同时该层出现菱铁矿, 磁性颗粒以较粗的 PSD 颗粒为主。II-1 层沉积物  $\chi_{if}$  明显变大,

磁性矿物以 PSD 磁铁矿颗粒为主，同时含有磁赤铁矿和赤铁矿。II-2 层相比II-1 层磁化率值减小，指示磁性矿物含量相对较少，但磁性矿物仍以 PSD 磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿为主。以上分析表明，BWH 剖面磁性特征以 124 cm 为界呈显著垂向差异：I层随剖面变深呈以赤铁矿为主到以顺磁性矿物居多的转化，磁性弱且颗粒粗。II层以较多 PSD 磁铁矿为主，磁性强且颗粒细。但磁学方法得出的 $\chi_{if}$ 同时受含量与粒径影响，单一磁学参数存在指示意义重叠、难区分磁性特征变化主导因素的局限。因此，为量化提取剖面出现磁性变化差异的核心控制因素、验证剖面分层合理性，并为后续磁性特征变化机制讨论提供客观数据支撑，基于 $\chi_{if}$ 、 $\chi_{ARM}$ 、SIRM、SOFT、HIRM、S-ratio、 $\chi_{ARM}/\chi_{if}$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$  等 8 个磁学参数进行主成分分析。结果表明，两个主成分方差累计贡献率已经达到 89.174%，可以代表 8 个变量指标的总体信息 (Zeinalzadeh and Rezaei, 2017)。F1 在反映磁性强弱和亚铁磁性矿物磁铁矿相对含量 ( $\chi_{if}$ 、 $\chi_{ARM}$ 、SIRM、SOFT、S-ratio) 参数上有较大载荷 (表 1)，结合剖面沉积特征，F1 高值段对应浅棕黄色、分选较好的II层沉积物，野外观察发现该层有机质含量低且无明显还原斑，可能反映沉积时水动力较强、氧化条件较好，磁性矿物保存较好。F2 在反映磁性矿物粒径 ( $\chi_{ARM}/\chi_{if}$ ) 参数上有较大载荷 (表 1)，F2 低值段对应 $\chi_{ARM}/\chi_{if}$ 比值较低，磁性矿物整体粒径偏粗，可能出现于水动力较强的环境，也可能在强还原环境中，细粒磁铁矿优先溶解，残留的粗粒磁性矿物占比升高。

表 1 主成分因子载荷矩阵表

Table1 Principal Component Factor Loadings Matrix

变量	成分	
	1	2
SIRM	0.946	-0.267
S-ratio	0.933	-0.079
SOFT	0.933	-0.079
$\chi_{ARM}$	0.907	-0.046
$\chi_{ARM}/SIRM$	-0.868	-0.317
HIRM	0.811	0.545
$\chi_{if}$	0.750	-0.545
$\chi_{ARM}/\chi_{if}$	0.141	0.948

通过主成分分析式计算得分并投影发现：I层沉积物整体分布于二、三象限，F1 得分介于-3~0，说明I层沉积物中亚铁磁性矿物磁铁矿含量较少，并且其中存在磁性矿物粒径的差异 (图 8)。与I层不同的是，II层沉积物分布在一、四象限，位于 F1 正半轴 0~4，说明II层沉积物磁性增强，磁铁矿、赤铁矿含量相对较高，同时在 F2 所指示的磁性特征上沉积物投影从正轴逐渐转变到负轴表明磁性颗粒粒径逐渐变粗。根据不同深度样品的投影结果，结合

磁铁矿是 BWH 剖面主要载磁矿物，说明 F1 所指示的亚铁磁性矿物磁铁矿含量差异是使 BWH 剖面 I 层与 II 层沉积物间磁性特征发生变化的主要因素，因此需要对沉积物中磁铁矿含量的变化机制做进一步深入分析。

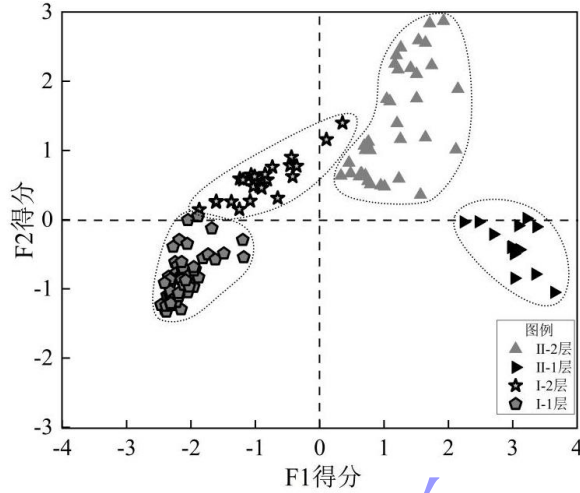


图 8 BWH 剖面不同层位沉积物样品 PCA 得分投影

Fig.8 PCA score projections of sediment samples from different stratigraphic layers at the BWH profile

### 3.2 BWH 剖面沉积物磁性特征的变化机制

沉积物磁性特征受沉积物的物源、水动力大小以及沉积后的次生变化等因素影响，这些因素往往又是受气候变化、人类活动等所控制的 (Thompson and Oldfield, 1986)。霸王河是发源于秦岭主峰太白山北麓，自南向北汇入渭河的山前小型支流。河流自源地至南坪出口均位于太白山自然保护区北部，源岩主要为典型二长花岗岩，河流向北流经混合岩区，岩区主要矿物成分为斜长石、钾长石、石英及黑云母、绿泥石 (马乃喜, 1982; 李刚, 2009; 唐欢和张宏福, 2017)。第四纪以来，霸王河流域地貌格局已基本确定 (高庙—霸王河综合地貌第四纪示意图 (徐建辉和谢又予, 1987))，随后未发生重大地质改造，稳定的地貌背景使得流域内花岗岩、片麻岩等基岩持续风化剥蚀，经河流搬运后在 BWH 剖面沉积，因此剖面沉积物物源长期保持稳定，物源不是引起磁性特征随深度显著变化的主要因素。河流对沉积物搬运过程的水动力条件变化，会影响沉积物磁性和粒级大小 (Mzuza *et al.*, 2017)。BWH 剖面 II-2 层沉积物 (22~100 cm) 为粉砂， $\chi_{if}$  均值为  $10.21 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，数值低且平稳， $\chi_{ARM}/\chi_{if}$  平均值为 2.01；II-1 层沉积物 (100~124 cm) 为粗砂， $\chi_{if}$  平均值为  $17.74 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ，数值较大且波动明显， $\chi_{ARM}/\chi_{if}$  平均值为 1.24，指示 II-1 层粗砂沉积物以 PSD 磁铁矿为主要载磁矿物，II-2 层粉砂沉积物磁铁矿含量相对较少，且磁性矿物颗粒更细，这种垂向变化可能是河流沉积环境中水动力分选作用的结果 (刘德政和夏非, 2021)，II-1 层沉积物受到的水动力条件更强，粗砂中夹杂的红棕色物质可能是洪水携带的河谷内被风化的红色片麻岩

碎屑。II-2层粉砂沉积物 $\chi_{lf}$ 、SIRM、 $\chi_{ARM}$ 、Soft和S-ratio的值相比于II-1层都有明显降低，而HIRM表现出波动上升，指示II-2层沉积物中亚铁磁性矿物含量减少，硬磁性矿物的相对含量和绝对含量都明显提升，对磁性的贡献变大，但亚铁磁性矿物依旧为该层载磁矿物。这主要可能是由于受季节性洪水影响，II层沉积物中孔隙水与上覆水体交换频繁，溶解氧浓度较高。河漫滩作为典型湿地类型（李闪闪和刘学勤，2024），BWH剖面II-2层沉积物中发现的植物根系残体，表明该沉积层曾有湿地植物生长。湿地植物普遍具有发达的通气组织，可通过根系向其周围沉积物释放氧气（杨俊兴等，2014），促使局部氧化环境形成。因此，红色片麻岩提供的铁元素在氧化环境中较易转化为 $Fe^{3+}$ ，形成了红棕色赤铁矿为主的铁氧化物，同时氧化环境促使弱成壤作用发生，可能导致有极细粒的磁铁矿生成使得 $\chi_{ARM}/\chi_{lf}$ 值升高（陶士康，2007；吉茹，2016；赵嘉雯等，2025）。

BWH剖面沉积物磁学参数在124 cm处发生明显分界变化。 $\chi_{lf}$ 、SIRM、 $\chi_{ARM}$ 和HIRM值急剧减少，但是 $\chi_{lf}$ 值和SIRM值减少的幅度要比 $\chi_{ARM}$ 小，这也说明在沉积阶段I中，随着细颗粒的溶解，相对难溶解的、较粗的假单畴、多畴颗粒成为主要沉积。 $\chi_{ARM}/\chi_{lf}$ 数值下降，Day图中样品分布由PSD区域逐渐转为MD区域，指示细粒磁铁矿优先被溶解、磁性矿物整体向粗粒转化，为还原环境下磁铁矿发生选择性溶解提供了直接磁学证据。另外，HIRM相对于 $\chi_{lf}$ 和SIRM值下降幅度大，沉积阶段I相对阶段II中S-ratio值的显著下降表明了反铁磁性矿物比磁铁矿在厌氧条件下更易于保存的现象（Thompson and Oldfield, 1986）。沉积阶段I样品的 $\kappa$ -T升温曲线在350 °C~420 °C开始快速地升高，指示菱铁矿的存在（Muxworthy *et al.*, 2023），菱铁矿属于典型的还原环境中成岩作用产物（黄志诚和刘冠邦，2014）。环境磁学研究证实，细粒亚铁磁性矿物对还原条件最为敏感，在富集有机质、弱氧化—强还原的沉积环境中极易发生溶解（Wu *et al.*, 2016；Ahn *et al.*, 2021；刘庚等，2021）。这一溶解特征与渭河盆地河湖相沉积、新疆博斯腾湖湖滨沉积等研究显示的成岩作用会导致细粒磁铁矿被选择性破坏，且 $\chi_{lf}$ 等值降低的规律高度相似（张英等，2013；何旭科等，2025）。阶段I沉积物以黏土、粉砂等细粒组分为主，长白山变质岩风化输入的绿泥石随细粒沉积物在阶段I富集，由于沉积阶段I长期处于水下还原环境抑制绿泥石中 $Fe^{2+}$ 氧化，避免其转化为棕色铁氧化物，使得BWH剖面阶段I的沉积物颜色主要为灰绿色、浅绿色。同时沉积阶段I中黏土的渗透性较差，能有效阻隔大气氧的补给，进一步加剧了沉积阶段I的还原程度。I-1层中的黑褐色黏土沉积物（204~222 cm）反映出该段沉积环境有机质丰富，有机质的分解将消耗水体中的溶解氧，因此在这种封闭、缺氧的环境下，有机质的厌氧降解驱动了微生物介导的成岩作用，最终促使含铁矿物发生溶解或转化，导致沉积物磁化率值降低（Ahn *et al.*,

2021)。I-2层沉积物 $\chi_{\text{lf}}$ 、SIRM和 $\chi_{\text{ARM}}$ 值随剖面深度的增加而快速减小,样品在Day图中的投影逐渐向MD端靠近,表明细粒磁铁矿的溶解加剧(Peters and Dekkers, 2003),指示阶段I沉积物(124~308 cm)处于还原阶段(Dekkers, 1988)。以上分析可见,氧化还原环境差异导致的亚铁磁性矿物磁铁矿含量变化是控制BWH剖面磁性特征的核心因素。由于磁学参数在不同的氧化还原带具有较大差异,因而利用磁学方法可以反映出沉积环境的变化(郑妍等, 2012)。

#### 4 结论

(1) BWH剖面磁性整体偏弱( $\chi_{\text{lf}}$ 均值 $10.04 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ),沉积特征以124 cm为界呈垂向分异:阶段II(24~124 cm)沉积物磁性较强以PSD磁铁矿、磁赤铁矿为主,同时含少量赤铁矿。阶段I(124~308 cm)磁性矿物组合随深度出现变化,I-2层(124~204 cm)沉积物磁性较弱,以较粗PSD赤铁矿和菱铁矿为主;I-1层(204~308 cm)沉积物中含有多畴磁铁矿和少量顺磁性矿物。

(2) PCA结果进一步证实了剖面分层的合理性,两个主成分方差累计贡献率达89.174%,F1指示亚铁磁性矿物含量,F2指示磁性矿物粒径。阶段I沉积物投影分别分布于二、三象限,均位于F1的负半轴;阶段II沉积物投影均位于F1的正半轴,分析表明影响I、II层沉积物磁性差异的主要因素是亚铁磁性矿物磁铁矿含量。

(3) 不同沉积阶段磁性特征变化机制:阶段I以早期成岩作用为主,还原环境下细粒磁铁矿溶解。阶段II受水动力分选与弱成壤作用控制,岩性(粗砂—粉砂)变化反映水动力变化,同时该层沉积物 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{lf}}$ 均值达到剖面最大指示弱成壤作用促进细粒磁性矿物生成。

#### 数据可用性声明

支撑本研究的科学数据已在中国科学院科学数据银行(Science Data Bank, ScienceDB)平台公开发布,访问地址为<https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.cjxb.00016>和<https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.cjxb.00016>。

#### 参考文献(References)

- 安芷生,张培震,王二七,等. 2006. 中新世以来我国季风—干旱环境演化与青藏高原的生长[J]. 第四纪研究, 26(5): 678-693. [An Zhisheng, Zhang Peizhen, Wang Erqi, et al. 2006. Changes of the monsoon-arid environment in China and growth of the Tibetan Plateau since the Miocene [J]. Quaternary Sciences, 26(5): 678-693.]
- 陈渠,刘秀铭,吕宾,等. 2022. 天山北麓黄土记录的30万年以来古气候演变[J]. 沉积学报, 40(3): 679-690. [Chen Qu, Liu Xiuming, Lü Bin, et al. 2022. Paleoclimatic changes since 300 ka recorded by loess deposits along the north pediment of Tianshan Mountains[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(3): 679-690.]
- 谌微微,张灵敏,刘沛瑜,等. 2024. 逐步加热 $\kappa$ -T实验的磁性矿物学应用[J]. 中国矿业, 33(8): 238-246. [Chen Weiwei, Zhang

- Lingmin, Liu Peiyu, et al. 2024. Magnetic mineralogical applications of stepwise heating  $\kappa$ -T experiments[J]. *China Mining Magazine*, 33(8): 238-246.]
- 成沁梓, 王峰, 陈锦, 等. 2020. 长江水下三角洲沉积物磁性特征空间差异及其冲淤指示意义[J]. *沉积学报*, 38(6): 1215-1225. [Cheng Qinzi, Wang Feng, Chen Jin, et al. 2020. Spatial variation of the magnetic properties from the Yangtze River subaqueous delta deposits and their implications for erosion/deposition study[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(6): 1215-1225.]
- 褚慧敏, 周立旻, 黄静, 等. 2016. 岷江上游干流边滩沉积物岩石磁学特征及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 36(4): 57-66. [Chu Huimin, Zhou Limin, Huang Jing, et al. 2016. Rock-magnetic properties of the point bar deposits in the upper magnetism of Minjiang River and their origin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(4): 57-66.]
- 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 2007. 中国黄土环境磁学[J]. *第四纪研究*, 27(2): 193-209. [Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin, et al. 2007. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences[J]. *Quaternary Sciences*, 27(2): 193-209.]
- 董靓雯, 姚政权, 石学法, 等. 2018. 渤海 BH08 孔磁学参数变化机制与环境指示[J]. *地球物理学报*, 61(11): 4530-4544. [Dong Jingwen, Yao Zhengquan, Shi Xuefa, et al. 2018. Variations of magnetic proxies in core BH08 from Bohai Sea and its environmental implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(11): 4530-4544.]
- 傅寒晶, 简星, 梁航海. 2021. 硅酸盐化学风化强度评估的沉积物指标与方法研究进展[J]. *古地理学报*, 23(6): 1192-1209. [Fu Hanjin, Jian Xing, Liang Hanghai. 2021. Research progress of sediment indicators and methods for evaluation of silicate chemical weathering intensity[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(6): 1192-1209.]
- 贺辰戈, 张桂华, 梁定辉, 等. 2024. 珠江三角洲花斑粘土磁学特征及其沉积环境实例研究[J]. *第四纪研究*, 44(5): 1349-1361. [He Chenjian, Zhang Guihua, Liang Dinghui, et al. 2024. A case study of magnetic properties and sedimentary environment of the spotted clay in the Pearl River Delta[J]. *Quaternary Sciences*, 44(5): 1349-1361.]
- 何旭科, 宋友桂, 李越, 等. 2025. 渭河盆地河湖相磁化率揭示中布容事件前后季风气候变化与沉积响应[J]. *地球科学进展*, 40(11): 1183-1195. [He Xuke, Song Yougui, Li Yue, et al. 2025. Lacustrine-fluvial magnetic susceptibility records from the Weihe Basin reveal monsoonal climate change and sedimentary response across the Mid-Brunhes Event[J]. *Advances in Earth Science*, 40(11): 1183-1195.]
- 黄志诚, 刘冠邦. 2014. 太湖现代沉积物中铁质结核特征: 对太湖形成机制的探讨[J]. *沉积学报*, 32(3): 503-509. [Huang Zhicheng, Liu Guanbang. 2014. Characteristics of ferruginous concretions in modern sediments of the Taihu Lake: Implications for the origin of Lake Taihu[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(3): 503-509.]
- 吉俊熹, 时硕, 陈莹璐, 等. 2022. 珠江三角洲全新世沉积物磁性特征及早期成岩作用分析[J]. *海洋学报*, 44(6): 89-105. [Ji Junxi, Shi Shuo, Chen Yinglu, et al. 2022. Magnetic characteristics and early diagenesis of Holocene sediments in the Zhujiang River Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 44(6): 89-105.]
- 吉茹. 2016. 长江三角洲 MQ 孔全新世沉积物磁性特征与沉积环境分析[D]. 金华: 浙江师范大学: 36-40. [Ji Ru. 2016. Magnetic properties of Holocene sediments in core MQ from the Yangtze River Delta and its implications for sedimentary environment reconstruction[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 36-40.]
- 李刚. 2009. 秦岭主峰太白山地区旅游地学特征及开发模式研究[D]. 西安: 长安大学: 9-38. [Li Gang. 2009. Study on tourism geo-science features and development model in the Taibai Mountain area of Qinling[D]. Xi'an: Chang'an University: 9-38.]
- 李海平, 陈隽璐, 陈永杰, 等. 2001. 北秦岭鸚鵡咀发现火山杂岩带[J]. *陕西地质*, 19(2): 104. [Li Haiping, Chen Juanlu, Chen Yongjie, et al. 2001. Foundation of the volcanic rock complex belt in Yinggezui North Qinling[J]. *Geology of Shaanxi*, 19(2): 104.]
- 李闪闪, 刘学勤. 2024. 长江中游河漫滩湿地植物功能性状分析[J]. *植物生态学报*, 48(5): 601-611. [Li Shanshan, Liu Xueqin. 2024. Analysis of functional traits of wetland plants in floodplains in middle reaches of Yangtze River[J]. *Chinese Journal of plant Ecology*, 2024, 48(5): 601-611.]
- 李文, 穆桂金, 林永崇, 等. 2021. 罗布泊盐湖沉积物磁性特征及其环境意义[J]. *干旱区研究*, 38(1): 257-266. [Li Wen, Mu Guijin, Lin Yongchong, et al. 2021. Magnetic properties of Lop Nur saline sediments and the environmental implications[J]. *Arid Zone Research*, 38(1): 257-266.]
- 刘德政, 夏非. 2021. 江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 41(5): 210-220. [Liu Dezheng, Xia Fei. 2021. Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments

- from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 41(5): 210-220.]
- 刘庚, 韩喜彬, 陈燕萍, 等. 2021. 南黄海沉积物磁性特征及其对物源变化的指示: 以南黄海中部泥质区 YSC-10 孔为例[J]. *沉积学报*, 39(2): 383-394. [Liu Geng, Han Xibin, Chen Yanping, et al. 2021. Magnetic characteristics of core YSC-10 sediments in the central Yellow Sea mud area and implications for provenance changes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(2): 383-394.]
- 罗超, 郑妍, 郑洪波, 等. 2013. 长江流域悬浮物磁性特征及其物源指示意义[J]. *第四纪研究*, 33(4): 684-696. [Luo Chao, Zheng Yan, Zheng Hongbo, et al. 2013. Magnetic properties of suspended sediment in the Yangtze River and its provenance implications[J]. *Quaternary Sciences*, 33(4): 684-696.]
- 马乃喜. 1982. 秦岭主峰: 太白山[M]. 西安: 陕西科学技术出版社: 30-40. [Ma Naixi. 1982. The main peak of Qinling Mountains-Taibai Mountain[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press: 13-16.]
- 马兆颖, 咎金波, 方小敏, 等. 2024. 西宁盆地岩石磁学记录揭示的始新世—中新世古环境演化及驱动机制[J]. *第四纪研究*, 44(6): 1601-1611. [Ma Zhaoying, Zan Jinbo, Fang Xiaomin, et al. 2024. Paleoenvironmental evolution and driving mechanism of Eocene to Miocene revealed by rock magnetic records in Xining Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 44(6): 1601-1611.]
- 潘永信, 林缅甸, 郝锦琦. 1999. 菱铁矿热转变过程中岩石磁学性质基本特征[J]. *地球物理学报*, 42(6): 756-763. [Pan Yongxin, Lin Mian, Hao Jinqi. 1999. Rock-magnetic properties related to thermal mineral alterations in siderite samples[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(6): 756-763.]
- 潘永信, 朱日祥, 刘青松, 等. 1998. 热处理中菱铁矿的磁化率变化与其各向异性交换特征[J]. *科学通报*, 43(12): 1319-1323. [Pan Yongxin, Zhu Rixiang, Liu Qinsong, et al. 1998. Magnetic susceptibility variation and AMS exchange related to thermal treatment of siderite [J]. *Science Bulletin*, 43(12): 1319-1323.]
- 唐欢, 张宏福. 2017. 北秦岭西部榴闪岩的发现与变质作用过程: 锆石年代学和 Hf-O 同位素制约[J]. *岩石学报*, 33(8): 2575-2590. [Tang Huan, Zhang Hongfu. 2017. Discovery of garnet amphibolite in western part of the North Qinling orogenic belt and its inferred metamorphic process: Constraints from zircon geochronology and Hf-O isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8): 2575-2590.]
- 陶士康. 2007. 长江三角洲地区晚新生代沉积物磁性特征及其沉积环境、物源与古气候意义[D]. 上海: 华东师范大学: 39-46. [Tao Shikang. 2007. Magnetic properties of Late Cenozoic sediments in the Yangtze River Delta and implications for their sedimentary environment, provenance and paleoclimate[D]. Shanghai: East China Normal University: 39-46.]
- 王红强, 张世红, 李海燕. 2008. 北京北安河地表沉积物的岩石磁学特征及环境意义[J]. *科学通报*, 53(13): 1589-1597. [Wang Hongqiang, Zhang Shihong, Li Haiyan. 2008. Mineral magnetic properties of surface sediments at Bei'anhe, Beijing, and its environmental significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(13): 1589-1597.]
- 王磊, 潘永信, 李金华, 等. 2008. 黄铁矿热转化矿物相变过程的岩石磁学研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 38(9): 1068-1077. [Wang Lei, Pan Yongxin, Li Jinhua, et al. 2008. Magnetic properties related to thermal treatment of pyrite[J]. *Science in China Earth Sciences*, 38(9): 1068-1077.]
- 王晓雪, 聂军胜, Saylor J, 等. 2018. 札达盆地晚中新世河湖相沉积物环境磁学特征与印度季风演化[J]. *第四纪研究*, 38(5): 1094-1100. [Wang Xiaoxue, Nie Junsheng, Saylor J, et al. 2018. Environmental magnetic characteristics of Late Miocene fluvio-lacustrine sediments in Zhada Basin and Indian monsoon evolution[J]. *Quaternary Sciences*, 38(5): 1094-1100.]
- 肖春风, 孙启顺, 陈亮, 等. 2023. 南海西北部 16 ka BP 以来沉积物的环境磁学特征及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 43(1): 13-26. [Xiao Chunfeng, Sun Qishun, Chen Liang, et al. 2023. Environmental magnetic characteristics and provenance significance of sediments in NW South China Sea since the past 16 ka[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 43(1): 13-26.]
- 徐建辉, 谢又予. 1987. 秦岭太白山北麓砾石层的成因及第四纪古冰川问题[J]. *地理研究*, 6(1): 53-60. [Xu Jianhui, Xie Youyu. 1987. On the origin of gravels and quaternary glaciers at the north foot of Tai Bai Mountain in Qinling[J]. *Geographical Research*, 6(1): 53-60.]
- 徐新文, 强小科, 符超峰, 等. 2012. 鹤庆盆地早更新世以来湖相沉积物中早期还原成岩过程的岩石磁学证据[J]. *第四纪研究*, 32(4): 812-819. [Xu Xinwen, Qiang Xiaoke, Fu Chaofeng, et al. 2012. Rock magnetic evidence for early diagenesis in the Pleistocene lacustrine sediments from Heqing Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 32(4): 812-819.]

- 杨俊兴, 任红艳, 郭庆军. 2014. 湿地植物通气组织和渗氧对其重金属吸收和耐性研究进展[J]. 土壤, 46(3): 394-401. [Yang Junxing, Ren Hongyan, Guo Qingjun. 2014. Effects of aerenchyma and radial oxygen loss of wetland plants on their heavy metal uptake and tolerance: A review[J]. Soils, 46(3): 394-401.]
- 张曼. 2015. 武义江沉积物磁性与地球化学特征及其环境意义[C]//2015年浙江省地理学会学术年会会议论文摘要集. 宁波: 浙江省地理学会, 宁波大学: 16.[Zhang Man. 2015. Magnetic and geochemical characteristics of sediments in Wuyi River and their environmental significance[C]//Abstracts of the 2015 Annual Academic Conference of the Zhejiang Geographical Society. Ningbo: Zhejiang Geographical Society, Ningbo University: 16.]
- 张英, 夏敦胜, 赵瑞瑞, 等. 2013. 新疆博斯腾湖湖滨沉积物的磁学特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 33(4): 93-102. [Zhang Ying, Xia Dunsheng, Zhao Ruirui, et al. 2013. Magnetic properties of the lakeshore sediments of the Bosten Lake, Xinjiang, China and their environmental implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 33(4): 93-102.]
- 赵嘉雯, 王龙升, 张玉柱, 等. 2025. 若尔盖盆地黄河牛轭湖古河道沉积物磁学特征及其古环境意义[J]. 地理学报, 80(1): 167-182. [Zhao Jiawen, Wang Longsheng, Zhang Yuzhu, et al. 2025. Magnetic characteristics of paleochannel sediments of the Yellow River in the Zoige Basin and their paleoenvironmental significance[J]. Acta Geographica Sinica, 80(1): 167-182.]
- 赵雨阳. 2023. 岩石高温的磁化响应行为和机制研究[D]. 西安: 西安科技大学: 66-74. [Zhao Yuyang. 2023. Study on magnetization response behavior and mechanism of rock at high temperature[D]. Xi'an: Xi'an University of Science And Technology: 66-74.]
- 郑妍, 郑洪波, 邓成龙, 等. 2012. 还原成岩作用对磁性矿物的影响及古气候意义: 以长江口水下三角洲岩芯 YD0901 沉积物为例[J]. 第四纪研究, 32(4): 655-662. [Zheng Yan, Zheng Hongbo, Deng Chenglong, et al. 2012. Diagenetic alteration on magnetic minerals and the paleoclimate implications, results from core YD0901 of Yangtze subaqueous delta[J]. Quaternary Sciences, 32(4): 655-662.]
- 周鸣亮, 张春霞, 郭正堂. 2023. 中中新世秦安黄土—古土壤序列磁性增强机制及其环境意义[J]. 地球物理学报, 66(8): 3316-3334. [Zhou Minliang, Zhang Chunxia, Guo Zhengtang. 2023. Magnetic enhancement mechanism of loess-soil sequence at Qinan during Middle Miocene and its paleoclimate significance[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(8): 3316-3334.]
- 朱筱敏, 谈明轩, 董艳蕾, 等. 2019. 当今沉积学研究热点讨论: 第20届国际沉积学大会评述[J]. 沉积学报, 37(1): 1-16. [Zhu Xiaomin, Tan Mingxuan, Dong Yanlei, et al. 2019. Current hot topics of sedimentology: Comment on the 20th international sedimentological congress[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(1): 1-16.]
- 左其亭. 2021. 中国水科学研究进展报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社. [Zuo Qiting. 2021. Report on advances in water science research in China[M]. Beijing: China Water & Power Press.]
- Ahn H S, Lim J, Kim S W. 2021. Magnetic properties of a Holocene sediment core from the Yeongsan estuary, southwest Korea: Implications for diagenetic effects and availability as paleoenvironmental proxies[J]. Frontiers in Earth Science, 9: 593332.
- Badejo S A, Muxworthy A R, Fraser A, et al. 2021. Using magnetic techniques to calibrate hydrocarbon migration in petroleum systems modelling: A case study from the Lower Tertiary, UK Central North Sea[J]. Geophysical Journal International, 227(1): 617-631.
- Badesab F, Kadam N, Gullapalli S, et al. 2023. Control of source-to-sink processes on the dispersal, fractionation, and deposition of magnetic minerals in a tropical mesotidal estuarine system[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 24(11): e2023GC011178.
- Basavaiah N, Mahesh Babu J L V, Gawali P B, et al. 2015. Late Quaternary environmental and sea level changes from Kolleru Lake, SE India: inferences from mineral magnetic, geochemical and textural analyses[J]. Quaternary International, 371: 197-208.
- Chen Z Y, Zhang H Z, Lu H Y, et al. 2025. Evolution of the proto-Weihe River system during the Eocene-Oligocene: Evidence from sediment provenance of the Weihe Basin[J]. Geomorphology, 473: 109616.
- Dekkers M J. 1988. Magnetic properties of natural pyrrhotite Part I: behaviour of initial susceptibility and saturation-magnetization-related rock-magnetic parameters in a grain-size dependent framework[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 52(3-4): 376-393.
- Dunlop D J. 2002. Theory and application of the Day plot ( $M_{rs}/M_s$  versus  $H_{cr}/H_c$ ) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B3): EPM 4-1-EPM 4-22.
- Dunlop D J, Özdemir Ö, Fuller M D. 1998. Rock magnetism: Fundamentals and frontiers[J]. Physics Today, 51(9): 64-66.
- Ferrow E A, Sjöberg B A. 2005. Oxidation of pyrite grains: A Mössbauer spectroscopy and mineral magnetism study[J]. Hyperfine

- interactions, 163(1/2/3): 95-108.
- Guan Y L, Jiang Z X, Li S Z, et al. 2024. Magnetic response to the source-to-sink environmental changes in the bay of Bengal since ~60 ka[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 39(5): e2024PA004857.
- King J, Banerjee S K, Marvin J, et al. 1982. A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some results from lake sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(2): 404-419.
- Liu Y, Liu S C, Piedrahita V A, et al. 2024. Insights into a correlation between magnetotactic bacteria and polymetallic nodule distribution in the eastern Central Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(8): e2024JB029062.
- Maher B A. 1988. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites[J]. *Geophysical Journal International*, 94(1): 83-96.
- Muxworthy A R, Turney J N, Qi L, et al. 2023. Interpreting high-temperature magnetic susceptibility data of natural systems[J]. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1171200.
- Mzusa M K, Zhang W G, Kapute F, et al. 2017. Magnetic properties of sediments from the Pangani River Basin, Tanzania: Influence of lithology and particle size[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 143: 42-49.
- Nguyen T T H, Zhang W G, Li Z, et al. 2016. Magnetic properties of sediments of the Red River: Effect of sorting on the source-to-sink pathway and its implications for environmental reconstruction[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(2): 270-281.
- Passier H F, De Lange G J, Dekkers M J. 2001. Magnetic properties and geochemistry of the active oxidation front and the youngest sapropel in the eastern Mediterranean Sea[J]. *Geophysical Journal International*, 145(3): 604-614.
- Peters C, Dekkers M J. 2003. 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* 28(16/17/18/19): 659-667.
- Roberts A P, Pike C R, Verosub K L. 2000. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12): 28461-28475.
- Roberts A P, Tauxe L, Heslop D, et al. 2018. A critical appraisal of the "Day" diagram[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(4): 2618-2644.
- Thompson R, Oldfield F. 1986. *Environmental Magnetism*[M]. Dordrecht: Springer.
- Wang F, Zhang W G, Huang T Q, et al. 2022. Particle-size dependent magnetic property variations in the Yangtze Delta sediments of late Holocene: Effects of pedogenesis and diagenesis[J]. *Catena*, 209(Pt 1): 105832.
- Wu X D, Wang Y, Bian L, et al. 2016. Diagenetic effects on magnetic minerals in a Holocene lacustrine sediment core from Huguangyan Maar Lake, Southeast China[J]. *Geophysical Journal International*, 206(3): 1586-1598.
- Xue P F, Huang R, Chang L, et al. 2025. A 45-Ma environmental magnetic record of paleoclimate and tectonics from Eocene-present South China Sea sediments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130(12): e2025JB032387.
- Zeinalzadeh K, Rezaei E. 2017. Determining spatial and temporal changes of surface water quality using principal component analysis[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13: 1-10.
- Zhang G H, Ouyang T P, Li M K, et al. 2026. Land-sea transition of the Pearl River Delta during the Holocene: An environmental magnetic perspective[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 682: 113434.
- Zhang G Y, Wang L S, Wang X H, et al. 2025. Magnetic characteristics of sediments in the northern Yangtze River Delta since MIS3 and their responses to palaeoenvironmental changes[J]. *Catena*, 257: 109200.
- Zhang X Z, Wang Y H, Li G X, et al. 2023. Authigenic greigite in late MIS 3 sediments: Implications for the Yellow Sea cold water mass and Yellow Sea warm current evolution[J]. *Marine Geology*, 460: 107057.
- Zhao X Q, Zhang W, Wang F G, et al. 2023. Late Holocene sediment provenance change in the Red River Delta: A magnetic study[J]. *Catena*, 220: 106685.

# Study on Magnetic Characteristics and Variation Mechanisms of Sediments in the Bawang River in the Northern Foot of the Qinling Mountains

ZHANG JunHui<sup>1,2</sup>, ZHANG Ge<sup>1</sup>, WU JiaKun<sup>1,2</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, LIU JunHeng<sup>1</sup>, YANG WeiDong<sup>1,2</sup>, WU BoWen<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, HAO LiangLiang<sup>1</sup>, MIAO LeBin<sup>1</sup>, JIN ZeYun<sup>1</sup>

1. College of Geograghy and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721000, China

2. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji, Shaanxi 721013, China

**Abstract:** [Objective] The northern foot of the Qinling Mountains lie in the transitional zone between China's northern and southern geomorphological units, serving as a critical link between the Loess Plateau and the Qinling orogenic belt. Conducting research on magnetic characteristics of river sediments in this region holds significant scientific value and theoretical implications for understanding regional environmental evolution processes, sedimentary response mechanisms, and exploring basin-wide environmental change patterns. [Methods] This study focused on the floodplain sediment profile of the lower Bawang River in the northern foothills of Qinling Mountains. Through systematic environmental magnetism analysis combined with principal component analysis (PCA), we investigated magnetic characteristics and dominant mechanisms across different sedimentary stages. [Results] The sedimentary profile exhibited distinct differentiation at the 124 cm depth marker, with generally weak magnetic properties. In the lower profile of Stage I (308-124 cm), the sediments exhibit relatively weak magnetism, with magnetic minerals primarily consisting of hematite and siderite, along with minor magnetite, with magnetic particle sizes gradually coarsening into multi-domain (MD) particles. Stage II (124-24 cm) sediments showed significantly enhanced magnetism, primarily consisting of small sized pseudo-single domain (PSD) magnetite and magnetite, alongside minor hematite content. PCA results further confirmed stratification features: the cumulative contribution rate of two principal components ferromagnetic mineral content and magnetic particle size reached 89%. Variations in magnetite content within ferromagnetic minerals were the dominant factor explaining magnetic differences across sedimentary stages. [Conclusions] Stage I sediments remained submerged in a reducing environment for prolonged periods, leading to dissolution of magnetite under early diagenetic processes. Stage II sediments, exposed to an oxidizing environment, exhibited magnetic characteristics shaped by hydrodynamic sorting and weak soil-forming processes. This study enhances our understanding of factors influencing sediment diagenesis, providing crucial reference materials for analyzing the characteristics of sedimentary environment changes and climatic environmental variations in the Wei River Basin.

**Key words:** the Northern Foot of the Qinling Mountains; river sediments; environmental magnetism; diagenesis