黄河水下三角洲钻孔沉积物磁学记录及其年代学意义

陈艇¹, 刘青松^{2,3*}, 郑一^{4*}

1. 重庆师范大学, 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331;

2. 南方科技大学海洋科学与工程系海洋磁学中心, 深圳 518055;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

4. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055

* 联系人, E-mail: qslu@sustech.edu.cn; zhengy@sustech.edu.cn

2021-06-03 收稿, 2021-08-18 修回, 2021-08-19 接受, 2021-08-24 网络版发表

重庆师范大学博士启动/人才引进项目(20XLB021)和国家自然科学基金(51961125203, 41904069)资助

摘要 自1976年从清水沟入海之后, 黄河受水库修建、水土保持等自然与人类活动影响强烈, 入海泥沙逐年减少. 2002年, 黄河开始调水调沙, 进一步改变了黄河入海泥沙格局. 目前, 已有较多研究通过水深测量、遥感等方法研究黄河三角洲的冲淤演变, 但还较缺乏沉积记录方面的支持. 以1976年以来黄河入海口附近水下三角洲沉积钻孔YD01、YD02和YD03为材料, 对3个钻孔进行详细的环境磁学和岩性分析, 探讨1976年以来黄河口水下三角洲沉积物磁学特征, 及其对黄河间尾摆动、流域水库建设、调水调沙等活动的响应, 及可能的年代学意义. 研究结果表明, YD01、YD02和YD03孔磁学参数 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{ARM} 和岩性特征较灵敏地响应了1976年黄河改道经清水沟入海、1986年龙羊峡水库建设、2002年黄河调水调沙及2007年左右调水调沙能力减弱等自然和人类活动与过程. 在3个钻孔中, 这些磁学和岩性特征变化显著的界面可以作为黄河口沉积物定年的参考点.

关键词 黄河三角洲, 调水调沙, 环境磁学, 黄河改道, 泥沙来源

大河三角洲为人类提供了重要的生存环境, 往往是人类经济、社会、文化发展的中心. 研究三角洲的发育与演化规律是指导三角洲的开发与利用的重要前提. 黄河是全世界含沙量最大的河流^[1], 其三角洲的发育模式、规律以及受控机理受学者广泛关注^[2-4]. 1885年, 黄河向北改道入渤海, 并形成了现代黄河三角洲^[5]. 之后, 黄河又经历几次改道, 在1976年, 经人工改道, 黄河从清水沟入海, 随即形成最新的黄河三角洲^[6](图1). 近几十年来, 黄河流域水土保持水平较高, 加上黄河中上游水库的截水拦沙, 黄河入海泥沙量持续降低^[2]. 2002年开始, 小浪底水库开始调水调沙, 黄河入海水沙组合也发生显著改变^[2,9,10]. 在这些自然和人类活动共同影响下, 黄河三角洲地形地貌演化是被广泛关注的

研究内容.

黄河口沉积物不仅可以记录长时间尺度的河口动力和泥沙来源变化, 还能响应流域河流改道、调水调沙等活动^[11,12]. 因此, 连续的沉积物记录可以为地貌演化过程及其成因提供直接的证据. 然而, 关于黄河三角洲沉积地貌演变研究主要基于海岸线变化、逐年水深数据以及遥感影像数据等^[2,3,13-15], 还较缺乏河口区连续沉积记录的支持. 这可能是由于黄河口位置以及流域输沙量不稳定、沉积环境变化频繁、黄河口沉积物定年较困难所致^[16].

磁学手段具有快速、简便、对样品无损耗等优势, 在黄土、海洋、湖泊等环境中应用广泛^[17]. 近十几年来, 环境磁学还被应用到河口-三角洲体系中. 环境磁

引用格式: 陈艇, 刘青松, 郑一. 黄河水下三角洲钻孔沉积物磁学记录及其年代学意义. 科学通报, 2021, 66: 3902-3915

Chen T, Liu Q S, Zheng Y. Environmental magnetic properties of core sediments in the Yellow River subaqueous delta and their chronological applications (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3902-3915, doi: 10.1360/TB-2021-0528

学对河口-三角洲沉积环境演变^[18,19]、沉积物物源^[20]、流域土壤侵蚀^[21]、调水调沙^[12]、气候-海平面变化^[22]等都具有良好的指示意义。在黄河三角洲地区,刘修锦等人^[23]基于磁学和粒度结果研究了黄河三角洲刁口叶瓣全新世以来沉积环境演化序列。彭俊等人^[24]研究了黄河三角洲潮滩沉积物的磁学特征,显示对细粒磁性矿物敏感的参数 χ_{ARM} (anhysteretic remanent magnetization, ARM)、 $\chi_{ARM}/SIRM$ (saturation isothermal remanent magnetization, SIRM)与沉积物中黏土含量变化具有较好的对应关系。王永红等人^[25]研究了黄河三角洲沉积物中胶黄铁矿的形成,并分析了沉积环境和气候变化对胶黄铁矿形成与保存的影响。王琬璋等人^[12]基于古地磁和环境磁学结果探讨了调水调沙对黄河口沉积物磁学性质的影响。另外,也有研究关注黄河三角洲土壤红尘的磁学性质及环境指示意义^[26]。

2018年,我们在黄河口外南部水深约5~10 m之间

获得了3个钻孔(YD01、YD02、YD03, 图1)。每个钻孔都被打到了1976年黄河泥沙沉积与早期大陆架沉积物的界面,即都包括了1976年以来的沉积物。本研究首先结合岩性特征判断结果和1976年以来实测年代-水深数据,对沉积物进行了定年,在详细的环境磁学研究基础上,探讨现行黄河水下三角洲磁性特征及其对流域环境变化和人类活动的响应,并试图探讨环境磁学参数的年代指示意义。

1 材料和方法

2018年5月,我们在1976年的黄河口东部、现行黄河口(1996年以来)南部附近获得YD01(119.339675°E, 37.70998611°N)、YD02(119.3546626°E, 37.70914381°N)和YD03(119.385857°E, 37.70526048°N)三个钻孔(图1),钻孔深度分别为12、10和6 m,钻孔位置水深分别为4、5.1和10 m。野外取样后,在实验室对岩芯的颗粒粗

图1 (网络版彩色)黄河三角洲区域图以及黄河口附近切变锋^[7,8]与研究钻孔(YD01、YD02和YD03)的位置

Figure 1 (Color online) Map of the Yellow River Delta, showing the tide shear front^[7,8] and location of cores YD01, YD02, and YD03

细、颜色、有机质含量等岩性特征进行了详细的描述。之后,根据岩性特征判断结果,对1976年以来的沉积物按照~3 cm间隔进行取样,YD01、YD02和YD03孔分别获得357、286、158个样品。

对所有样品进行了高频和低频磁化率测试,按照低频磁化率和频率磁化率结果,再每隔2个样品选1个样品进行无磁滞剩磁、等温剩磁的测试。之后,根据各层段磁学参数变化规律选择代表性样品进行 κ - T 曲线(磁化率随温度变化曲线)、IRM(等温剩磁)获得曲线、Loop(磁滞回线)和FORC(一阶反转曲线)测试。各测试方法如下。

利用MFK1-FA多频各向异性磁化率仪测试低频磁化率 χ_{lf} (976 Hz)和高频磁化率 χ_{hf} (15616 Hz),并计算频率磁化率百分数:

$$\chi_{fd} \% = \frac{\chi_{lf} - \chi_{hf}}{\chi_{lf}} \times 100. \quad (1)$$

利用D-2000交变退磁仪在峰值为100 mT的交变场和0.05 mT直流场条件下获得非磁滞剩磁(ARM)。之后,利用JR-6A旋转磁力仪测试ARM,并计算 χ_{ARM} 。

利用脉冲磁力仪和JR-6A旋转磁力仪测试饱和(1 T)、反向场-300 mT条件下的IRM。根据这些结果计算获得饱和等温剩磁(SIRM)、硬剩磁(hard isothermal remanent magnetization, HIRM)、 $S_{-300 \text{ mT}}$ 、 χ_{ARM}/SIRM 等参数。其中, $\text{SIRM}=\text{IRM}_{1\text{T}}$; HIRM和 $S_{-300 \text{ mT}}$ 计算公式如下:

$$\text{HIRM} = \frac{\text{SIRM} + \text{IRM}_{-300 \text{ mT}}}{2}, \quad (2)$$

$$S_{-300 \text{ mT}} = \frac{\text{SIRM} - \text{IRM}_{-300 \text{ mT}}}{2\text{SIRM}} \times 100. \quad (3)$$

代表性样品 κ - T 曲线由MFK1-FA多频各向异性磁化率仪测试完成,IRM获得曲线、Loop和FORC图用振动样品磁力仪(VSM)完成。

以上所有测试工作都在南方科技大学海洋科学与工程系海洋磁学中心完成。

2 研究结果

2.1 YD01、YD02和YD03孔岩性特征

YD01孔岩性特征(图2(a)): 12~11.28 m,以青灰色粉砂质黏土为主,夹大量粉砂质团块,团块中见极少量贝壳碎屑,其中11.35~11.28 m见完整贝壳和大量贝壳碎屑; 11.28~4.51 m,为黄灰色均值粉砂,偶见极少量黏

土质纹/薄层; 4.51~2 m,黄灰色黏土质粉砂,夹大量粉砂薄层(2~5 cm)或纹层(约1 cm); 2~0 m黄灰色均质粉细砂,夹极少量黏土质纹层。

YD02孔岩性特征为(图2(b)): 10~9.23 m,青灰色粉细砂、粉砂; 9.23~4 m,黄灰色较均值粉砂/黏土质粉砂,向上粒径有变细的趋势,底部30 cm见青灰色杂斑; 4~2 m,黄灰色粉砂,夹少量黏土质粉砂纹层; 2~1 m主要为黄灰色粉细砂,夹少量黏土质粉砂纹层; 1~0 m黄灰色粉砂、黏土质粉砂,夹黏土质纹层、条带。

YD03孔岩性特征为(图2(c)): 6~4.5 m,青灰色黏土质粉砂,夹大量粉砂质团块; 4.5~3.4 m,黄灰色较均值粉砂,底部50 cm见青灰色杂斑以及粉细砂团块,向上粒度有变细的趋势; 3.4~2 m,黄灰色黏土质粉砂,夹大量mm级到cm级不等厚粉砂薄层、纹层; 2~0 m,黄灰色粉砂、粉细砂,底部见多层黏土质粉砂(4~5 cm),顶部逐渐变细,为黏土质粉砂。

2.2 YD01~03三钻孔磁学结果

2.2.1 YD01孔磁性特征

YD01孔代表性样品 κ - T 曲线(图3(a), (b))显示各样品在0~330°C随温度升高磁化率逐渐降低,这可能主要与顺磁性矿物解阻有关^[27]。从~330°C开始,随温度升高,各样品磁化率急剧升高,反映了含铁硅酸盐、黏土矿物等顺磁性矿物在加热条件下向强磁性矿物转化^[28]。当加热到~580°C时,各样品磁化率显著降低,表明了磁铁矿的居里温度^[27]。当温度超过~580°C时磁化率继续降低,表明了赤铁矿等磁性矿物的存在^[27]。 κ - T 降温曲线都在~580°C时显著升高,且磁化率大于升温时的磁化率,也表明加热过程中新生成了较多强磁性的磁铁矿。各代表性样品Loop曲线都为细腰形(图3(c)),在~400 mT时闭合,表明样品中磁性主要由低矫顽力的磁铁矿贡献。IRM获得曲线中(图3(d)),外场从0 mT升高到100 mT期间,样品剩磁快速升高,表明样品中低矫顽力磁性矿物对磁性的绝对贡献,在~1 T时还没有达到饱和,表明高矫顽力赤铁矿的信息,与 κ - T 加热曲线结果一致。FORC图中各代表性样品(图3(e)~(h))中心矫顽力值都在~10 mT附近,结合 κ - T 曲线,说明样品中磁性矿物主要以低矫顽力的磁铁矿为主^[29]。样品YD01-9.60 m、YD01-6.85 m、YD01-2.83 m边缘部分在纵轴上也有一定分布,表明单畴(single domain, SD)、准单畴(pseudo single-domain, PSD)以及多畴(multi-domain, MD)颗粒的混合^[29]。在Day图中(图S1),YD01孔

图2 YD01 (a)、YD02 (b)和YD03 (c)孔典型层段岩性特征

Figure 2 Lithology photos of typical zones of cores YD01 (a), YD02 (b) and YD03 (c)

代表性样品都落在PSD磁性颗粒区间内^[30], 与FORC图表明结果一致。但是各代表性样品FORC图中心区域沿纵轴展布范围较窄, 表明以SD细颗粒磁铁矿为主^[31], 其中样品YD01-2.83 m等值线沿纵轴展布相对更窄, 表明样品中细颗粒SD等磁性矿物含量相对更高。样品YD01-0.50 m等值线沿纵轴方向展布较宽, 表明PSD、MD等粗颗粒磁铁矿含量相对更高。

根据岩性和磁学参数变化特征(图3(i)), YD01孔1976年界线以上的沉积物可以被划分为4个阶段。

(1) Unit I(11.4~8.0 m)阶段。 $\chi_{fd}\%$ 值相对较高, 介于5%~20%之间, 平均值为10.6%, 说明超顺磁(superparamagnetic, SP)颗粒含量较高。 χ_{lf} 为全孔最高值, 平均值

达 $40.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 且与 $\chi_{fd}\%$ 有相似的变化规律, 表明该阶段 χ_{lf} 受SP磁性颗粒影响较大。对细颗粒磁性矿物(单畴, SD)敏感参数 χ_{ARM} 和 χ_{ARM}/SIRM 也较高, 表明SD磁性颗粒含量也较高, 磁性矿物整体粒径较细。SIRM和HIRM值也相对较高, 表明高矫顽力赤铁矿等含量也较大, $S_{-300 \text{ mT}}$ 平均值为93.1%, 表明样品中剩磁主要由低矫顽力磁铁矿贡献。

(2) Unit II(8.0~4.5 m)阶段。参数 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{lf} 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/SIRM 降低, 表明纳米级SP和SD磁性颗粒含量降低, 样品中平均粒径略微升高, 与代表性样品YD01-6.58 m FORC图的结果一致。SIRM变化不大, HIRM值略微降低, 表明高矫顽力磁性矿物绝对含量略有降

图3 YD01孔代表性样品 κ - T 曲线(a, b)、Loop曲线(c)、IRM获得曲线(d)、FORC图(e-h)以及所有样品环境磁学参数结果(i)。 (i)中蓝色箭头表明磁化率 χ_{lf} 的5次波动

Figure 3 κ - T curves (a, b), loops (c), IRM acquisition curves (d), FORC diagrams (e-h) for representative samples of core YD01 and magnetic parameters (i) for core YD01. Blue arrows in (i) show five fluctuations of χ_{lf}

低。 $S_{-300\text{ mT}}$ 值略微升高, 主要与高矫顽力磁性矿物含量降低有关。

(3) Unit III(4.5~2 m)阶段。各参数波动频繁, 特别是4.5~3 m之间出现了5次较大波动, 与岩性特征“见粉砂薄层”一致(图2)。该阶段参数 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 都升高, 表明纳米级SP、SD磁性颗粒含量升高, 与代表性样品YD01-2.83 m的FORC图结果一致。SIRM和HIRM都显著降低, 表明相对较粗的磁铁矿、赤铁矿等磁性矿物含量降低。且 $S_{-300\text{ mT}}$ 也相对降低, 表明赤铁矿等高矫顽力磁性矿物相对含量略有升高。

(4) Unit IV(2~0 m)阶段。参数 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{If} 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 急剧下降, 表明粒径较细的SP和SD磁铁矿含量显著降低, 沉积物中磁性颗粒平均粒径显著降低, SIRM值升高, 与 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{If} 、 χ_{ARM} 等参数变化趋势相反, 表明PSD、MD等粗颗粒磁性矿物含量升高。这与该阶段代表性样品FORC的结果一致, 也与该阶段岩性变粗一致。HIRM值显著升高, $S_{-300\text{ mT}}$ 降低, 表明高矫顽力磁性矿物绝对和相对含量都升高。

2.2.2 YD02孔磁性特征

YD02孔的各代表性样品岩石磁学结果(图S2), 包括 κ -T曲线、Loop、IRM获得曲线和FORC图等, 与YD01孔差别不大, 反映磁性矿物类型等差别不大。根据环境磁学参数结果, 并结合岩性特征, YD02孔1976年界线以上的沉积物可以被划分为5个阶段(图4(a))。

(1) Unit I(9.3~7.58 m)阶段。参数 $\chi_{\text{fd}}\%$ (平均值为~11.0%)、 χ_{ARM} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 值较高, 表明细粒径SP和SD磁性颗粒含量较高, 且磁性颗粒平均粒度较细。代表性样品YD02-8.32 m的FORC图结果表明PSD、MD磁性矿物含量也较高(图S2)。SIRM和HIRM值相对较低, 表明赤铁矿等高矫顽力磁性矿物含量较低, $S_{-300\text{ mT}}$ 较高, 表明高矫顽力赤铁矿等含量较低。

(2) Unit II(7.58~4 m)阶段。 $\chi_{\text{fd}}\%$ (平均值为~9.7%)、 χ_{ARM} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 值降低明显, 表明SP和SD等磁性颗粒含量降低。SIRM和HIRM均升高, 表明PSD、MD等磁铁矿以及赤铁矿含量升高。 $S_{-300\text{ mT}}$ 在~6 m降低, 表明赤铁矿等高矫顽力磁性颗粒相对含量略升高。

(3) Unit III(4~2 m)。 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 均向上在~3.2 m处逐渐降低, 表明样品中SP和SD等磁性颗粒含量继续降低, HIRM升高显著。与之对应, $S_{-300\text{ mT}}$ 降低, 表明赤铁矿等绝对和相对含量升高。

(4) Unit IV(2~1 m)。该阶段各参数都显著降低, $S_{-300\text{ mT}}$ 变化不大, 表明样品中磁性矿物含量均降低, 且

磁性矿物颗粒平均粒径变粗, 与1.65 m处代表性样品FORC图显示的PSD、MD磁性颗粒含量升高一致, 该阶段岩性特征也变粗。

(5) Unit V(1~0 m)。该阶段各参数都升高, 表明样品中磁性矿物含量升高, 且SP、SD磁性颗粒含量升高明显。

2.2.3 YD03孔磁性特征

YD03孔典型样品 κ -T曲线、Loop、IRM获得曲线和FORC图等(图S3)与YD02和YD01孔的类似, 表明磁性矿物类型等与YD01和YD02孔的类似。Day图(图S1)表明YD03孔部分代表性样品相比YD01和YD02孔样品略微更靠近SD颗粒范围, 显示YD03孔部分样品磁性矿物粒径略细。FORC图也表明YD03孔沉积物(如YD03-4.25 m, YD03-2.23 m样品)中SD等细颗粒磁性矿物含量相对更高(图S3)。根据磁学参数结果, YD03孔1976年以来沉积物可以划分为5个阶段(图4(b))。

(1) Unit I(4.5~3.2 m)。该阶段参数 $\chi_{\text{fd}}\%$ (平均值为~14.3%)、 χ_{If} 和 χ_{ARM} 值都较高, 表明细颗粒SP和SD磁铁矿含量较高, 与FORC图结果一致。与钻孔中其他层段相比, SIRM和HIRM值达到最低, 其中 $S_{-300\text{ mT}}$ 平均值为~92%, 表明赤铁矿等含量较低, 以低矫顽力磁铁矿为主。

(2) Unit II(3.2~2 m)。该阶段参数 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{If} 、 χ_{ARM} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 略降低, 表明细颗粒SP和SD磁性矿物含量相对降低, SIRM、HIRM和 $S_{-300\text{ mT}}$ 与上一阶段相比变化不大, 表明高矫顽力赤铁矿等绝对和相对含量都变化不大。

(3) Unit III(2~1.15 m)。由底部向上参数 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{If} 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 逐渐降低, SP和SD等细颗粒磁铁矿含量降低。SIRM一般由细颗粒SD与粗颗粒PSD和MD亚铁磁性矿物贡献, 但是SD磁性颗粒含量在此阶段降低。因此推测, SIRM在该阶段升高可能由粗颗粒磁铁矿的升高引起。HIRM升高, $S_{-300\text{ mT}}$ 降低, 表明赤铁矿等绝对和相对都升高。

(4) Unit IV(1.15~0.7 m)。 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{If} 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 降低到最低值, 表明细颗粒磁性矿物含量显著减少, 整体磁性颗粒粒径变粗, FORC图也显示该阶段PSD、MD等粗颗粒磁性矿物含量较高。SIRM和HIRM略有降低。

(5) Unit V(0.7~0 m)。参数 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{If} 、 χ_{ARM} 、SIRM、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 显著升高, SP和SD等细颗粒磁性矿物含量升高, 与FORC图结果一致。HIRM和 $S_{-300\text{ mT}}$ 表明赤铁矿含量变化不大。

图 4 (网络版彩色)YD02孔(a)和YD03孔(b)环境磁学参数结果
Figure 4 (Color online) Magnetic parameters of core YD02 (a) and YD03 (b)

3 讨论

3.1 YD01、YD02和YD03孔年代模式

自1885年黄河入渤海以来,黄河入海口几经改道^[6],导致黄河三角洲沉积环境极不稳定,沉积物岩性变化频繁,因此,适用于十年-百年尺度沉积物定年的²¹⁰Pb、³⁷Cs等常规方法很难运用到黄河三角洲^[16]。但是,1934年以来黄河每次改道的时间都有较清楚的

历史记录,随河道改道,黄河三角洲沉积与侵蚀交替发生,沉积物岩性发生突变,因此,黄河三角洲沉积物岩性变化可以在一定程度上辅助定年^[6,16]。另外,自1976年以来,黄河水利委员会逐年测量了黄河入海口附近水深,因此,年代-水深数据也可以为年代模式提供参考^[12]。

1976~2018年的年代-水深数据结果显示(1976~2012年数据由中国海洋大学海洋地球科学学院毕乃双教授提供,图5),1976年YD01~YD03孔附近水深都在

~15 m, 与三角洲相和大陆架相沉积物的分界深度一致^[6]。可见, ~15 m水深以上沉积物都为1976年以来经清水沟输入的黄河泥沙, 15 m水深以下为大陆架沉积物。在钻孔深度为11.35 m附近, YD01孔上下地层岩性发生突变, 有大量贝壳碎屑, 其下覆地层为青灰色粉砂, 上覆地层为黄灰色粉砂, 表明该界面为一个典型的侵蚀界面(图2)。其下覆地层为大陆架沉积物, 上覆地层为黄河输入泥沙。因此, 我们判断YD01孔11.35 m深度以上沉积物为1976年黄河经清水沟输入的泥沙。YD02孔在钻孔深度为9.3 m出现岩性突变, 其上部为黄灰色粉砂, 下部主要为青灰色粗粉砂, 因此, 判断YD02孔的9.3 m处为1976年黄河泥沙开始沉积的深度。YD03孔在4.48 m出现岩性突变, 因此, 判断4.48 m对应年代为1976年。3个钻孔中1976年沉积物对应的水深分别在15.35、14.4、14.48 m, 与现代黄河三角洲开始沉积的水深~15 m大致相同。因此, 我们认为3个钻孔的1976年黄河泥沙开始沉积的分界线较为可靠。

各年水深数据受潮汐等因素影响, 钻孔中沉积物又受侵蚀、压实等影响, 因此, 无法将逐年测得的水深数据与沉积物的水深直接对应来定年。本研究中, 将3个钻孔底部1976年和顶部2018年(0 m)两个深度点作为定年的参考点, 先根据2018~1976年平均沉积速率计算年代(图5), 再与水深数据对比(图5), 估测各阶段年代误差。对比实测年代-水深和由沉积速率计算的年代结果(图5), 3个钻孔在2000~2018年间的年代与年代-水深结果差异最小, 表明根据平均沉积速率计算的年代在这

个阶段相对更可靠, 其中YD02孔最可靠, YD02孔在2000年以后的年代结果与年代-水深数据结果相差2年左右。对比3个钻孔环境磁学结果发现, 2000年以后, YD02和YD03孔 $\chi_{fd}\%$ 和 $\chi_{ARM}\%$ 具有相似的变化特征, 也表明根据平均速率获得的2000年以后的年代有较高的可信性。

年代-水深数据表明, 在2000年, YD01、YD02和YD03孔附近受到强烈的侵蚀, 使2000年测得的水深低于1994~1996年的水深。这主要与1996年之后黄河改道, 经清8流路入海, YD01~YD03孔附近远离河口, 沉积物遭到侵蚀有关。推测, YD01和YD02孔在1995~2000年期间沉积物被侵蚀。YD03孔附近侵蚀相对较弱, 在1997~2000年沉积物被侵蚀。前人研究结果显示, 2000年左右1976~1996年黄河入海口水下三角洲侵蚀强烈^[13]。3个钻孔Unit III和Unit II两个阶段岩性和磁性特征也发生突变。因此, 我们认为3个钻孔由平均沉积速率计算获得的2000年以前的沉积物(图3(b)和4(a), (b)中Unit I和Unit II)的实际年代大约为1996年以前。

根据上述方法获得的3个钻孔的年代是各种可能方法中最保守, 也是最值得信任的年代结果。

3.2 YD01~YD03孔环境磁学对自然和人类活动作用下黄河泥沙输入的响应

自1976年黄河经清水沟入海以来, 受水库截沙、流域水土保持等因素影响, 黄河入海泥沙量逐年降低^[2,3]。2002年黄河开始调水调沙, 入海泥沙输入略升高, 水沙组合季节变化明显^[2]。在~2007年以前调水调沙能力较强, 黄河口堆积速度较快^[10]。因受调水调沙冲刷, 下游河床沉积物变粗, 河床抗侵蚀能力增强, 在~2007年之后, 调水调沙能力减弱, 泥沙输入量减少, 黄河口堆积速率减缓^[2,3,13]。在2016~2017年间, 调水调沙停止^[13]。另外, 在调水调沙早期, 下游河床受冲刷的强度较大, 入海泥沙颗粒粒径先变粗, 后期因河床抗侵蚀能力增强, 下游河床粗粒沉积物供应减少, 导致入海沉积物粒度再次变细^[10,13,14]。河流改道方面, 1996年黄河尾间被人工改道进入清8流路。之后, 黄河入海口又多次发生小范围调整, 如2014年在自然作用下, 黄河口在东部分汉, 形成以南、北双汉入海的新格局^[13,14]。在上述自然和人类活动影响下, 黄河水下三角洲地貌特征时空变化显著。YD01、YD02和YD03孔岩性和环境磁学特征对这些变化和活动都有较好的记录与响应(图6)。

图5 (网络版彩色)YD01、YD02和YD03实测1976~2018年的年代-水深结果(点线图)和根据平均沉积速率计算获得的年代模型(直线)
Figure 5 (Color online) Measured water depth in years from 1976 to 2018 (dotted lines) at cores YD01, YD02 and YD03 and their age-models (straight lines) calculated by average sedimentation rate

3个钻孔在1976~1996年间的沉积物(Unit I和II)主要为均值粉砂(图2和6), 表明了三角洲前缘河口沙坝的沉积环境^[6,16]. 90%以上黄河泥沙来源于黄土高原^[32], 黄土成壤过程产生大量次生细颗粒SD和SP磁铁矿^[33]. 因此, 该阶段细颗粒SD和SP磁铁矿含量较高表明黄河泥沙输入较丰富. 这主要与该阶段黄河经1976~1996年流路入海, 黄河沉积物在河口切边锋拦截作用下, 快速在河口近岸堆积有关(图1)^[7,8], 也与1976~1996年间黄河泥沙通量相对较高有关(图6利津站泥沙通量). 对比YD01~YD03, 在1976~1996年间, YD02和YD03孔的 χ_{ARM} 值相对比YD01孔的高, 细颗粒磁性矿物含量相对更高, 3个钻孔代表性样品的Day图(图S1)表明YD03孔磁性矿物颗粒最细. 这主要是因为YD02和YD03孔相对距河口更远, 沉积动力相对更弱.

3个钻孔环境磁学特征显示Unit II阶段 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 要比Unit I阶段的低(图3(i)和4), 细粒SP和SD磁性颗粒含量相对减少. 以YD03孔的年代结果作为参考, 推测这可能主要与1986年龙羊峡水库修建, 导致黄河入海泥沙减少有关(图6利津站泥沙通量). 这一推测获得了如下支持: YD01和YD02钻孔位置附近1985年实测水深分别为12.51和13.31 m, 此外, 1985年以前3个钻孔沉积速率相对较高, 根据水深数据测算大概为每年0.3 m. 因此, 按这个沉积速率矫正, YD01和YD02孔附近1986年的实际水深大约分别在12.21和13 m. 这与YD01和YD02钻孔中Unit I和Unit II分界的水深12 m(钻孔深度为8.0 m)和12.68 m(钻孔深度为7.58 m)相差不大. 1976~1996年间黄河口不断向外延伸, 可能是YD01~YD03钻孔沉积物中SD和SP等细颗粒磁性矿物含量降低、粒度升高的一个影响因素, 但是黄河口向外延伸是个渐变过程, 如果黄河口向外延伸是YD01~YD03孔沉积物粒度变化的主要原因, YD01~YD03孔 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 等参数应该逐渐向上降低. 然而, 这些参数在Unit I和Unit II分界面附近快速降低, 且在Unit II阶段除有波动外, 没有逐渐降低的趋势, 因此, 我们排除黄河口向外延伸对YD01~YD03孔沉积物 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 变化的影响. 这主要可能与YD01~YD03孔在1976~1996年间一直处于河口沙坝环境, 沉积环境变化不大, 对黄河口向外延伸导致的粒度变化不敏感有关.

3个钻孔的 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 等参数与利津站泥沙年均中值粒径变化趋势不同(图6). 从全孔来看, 除YD02和YD03在III阶段外, 3个钻孔磁学参数表明的粒径与利

津站泥沙年均中值粒度的变化趋势大部分不同, 主要原因可能是黄河泥沙在利津站以后还会在河流输送、波浪和潮汐等作用下发生分选, 导致水下三角洲地区沉积物粒度并不会完全响应河流泥沙粗细的变化.

YD01孔Unit III阶段, 岩性主要以黄灰色黏土质粉砂为主, 夹大量粉砂薄层(2~5 cm)或纹层, 判断其为三角洲侧缘沉积环境^[16]. 这主要与黄河口在1996年经清8流路入海, YD01孔位置变为位于黄河入海口的侧缘有关. 该阶段SP和SD磁铁矿含量显著升高, 表明黄河泥沙输入显著升高. 推测, 这主要响应了2002年开始的调水调沙. 调水调沙之后, 黄河泥沙输入升高明显^[2], 这些泥沙经过清8流路入海, 并被搬运、沉积到YD01孔附近. 另外, 在2002~2004年间, 黄河口小范围摆动, 由东北转向正东入海^[13], 这也有利于泥沙向南输移. 值得注意的是, YD01孔4.5~3 m之间, χ_{If} 和 χ_{ARM} 出现5次大幅度波动(图3(i)蓝色箭头所示), 沉积物岩性也呈现薄层黏土质粉砂和粉砂互层的特征. 调水调沙后, 黄河泥沙输送主要发生在调水调沙期间^[2], 在调水调沙第一阶段, 小浪底水库上层清水冲刷下游河床, 下游河床沉积物粒度相对较粗, 因此, 在第一阶段下游黄河泥沙粒度相对较粗, 而在第二阶段, 三门峡等上游水库放水冲刷小浪底水库已拦截泥沙, 沉积物粒度相对较细^[2], 沉积物岩性可能出现粗-细节律性变化^[11]. 因此, YD01孔4.5~3 m之间, χ_{If} 和 χ_{ARM} 出现5次波动变化可能正好对应了5次调水调沙过程. 但是因为2002年黄河调水调沙量较小(图6), 且2007年进行了两次调水调沙(黄河泥沙公报, 2007), 因此, 较难划分出这5次调水调沙精确的年代.

YD02和YD03孔Unit III阶段磁性颗粒相对较粗, 而HIRM值明显升高. 前人研究结果显示, 黄土高原黄土-古土壤序列黄土层HIRM要比古土壤层HIRM值高^[34], 且有与表明细颗粒磁性矿物含量参数相反的特征^[35]. 赤铁矿等常见高矫顽力磁性矿物多在风力作用下以碎屑岩的形式从西北沙漠地区搬运到黄土高原^[33,36]. 因此, 我们推测HIRM表明的来源于黄土高原的高矫顽力赤铁矿与粗颗粒PSD、MD等磁铁矿具有相似的搬运和沉积特征, 可能与PSD、MD等粗颗粒磁铁矿一起被搬运和沉积. 因此, YD02和YD03孔在Unit III阶段的HIRM值升高, 可能也响应了2002年开始的调水调沙过程, 在这个过程中下游河床原始沉积的PSD、MD以及赤铁矿等磁性矿物被再次冲刷并搬运到河口地区. 与YD01孔相比, 两钻孔在该阶段SD和SP等磁性

颗粒含量没有快速升高,反而降低,可能是因为YD02和YD03孔地区相对更靠海,沉积物来源相对较少,被搬运到此的沉积物可能经过侵蚀-再沉积的过程^[37],因此,细颗粒磁性矿物含量较少。

3个钻孔的第IV阶段,SD和SP等细颗粒磁性矿物含量都显著降低,沉积物以粉细砂为主,推测该阶段受到了相对较严重的侵蚀作用。一方面,这可能与~2007年以后黄河泥沙供应比调水调沙初期(2002~2007年之间)显著降低有关。另一方面,虽然在2010年黄河泥沙输入有略微增强,但是该阶段泥沙输入相对调水调沙早期较低,并且在2009年左右,黄河再次在清8流路内小范围改道,以北北东方向入海有关,改道之后,大部分沉积物在现行黄河口更靠北的位置沉积^[13]。因此推测,这两方面的因素综合在一起导致YD01~YD03孔附近第IV阶段(~2007年以后)泥沙供应大量减少,侵蚀加剧。

YD02和YD03孔在Unit V阶段,黄河来源磁性矿物含量又升高,岩性也变为黏土质粉砂。这可能是因为2014~2017年间调水调沙中断,清8河口外受侵蚀严重,这些被侵蚀的沉积物,随潮流等作用,再被搬运到YD02和YD03孔附近沉积^[13]。

综上,3个钻孔各阶段对应的年代范围如下:Unit I阶段年代范围为1976~1986年。Unit II阶段年代范围为1986~1996年。因为2007年前后黄河来沙量都有降低,根据平均速率计算获得的年代也有误差,而且3个钻孔在Unit IV阶段受侵蚀过程复杂,我们只能判断Unit III和Unit IV分界节点的时间在2007年左右,并不能确定是2007年。因此,3个钻孔Unit III阶段年代范围为2002~2007年左右。在YD02和YD03孔Unit V与Unit IV界面,环境磁学和岩性进一步发生变化,根据上述讨论,推测该界面时间点可能在2014年左右,但是其精确年代还需要其他研究的佐证。

3.3 YD01~YD03孔环境磁学的年代学意义探讨

受河流改道、水库建设、调水调沙等自然和人类活动的影响,黄河口沉积环境变化频繁,常用的适用于近百年沉积物定年方法(²¹⁰Pb、¹³⁷Cs等),都很难在黄河口应用,因此导致黄河三角洲近百年沉积物相关研究相对迟缓。根据3.2节的讨论,YD01~YD03孔沉积物岩性和环境磁学特征对过去~40年以来黄河流域河流改道、水库建设、调水调沙等都能较好地响应,每个阶段沉积物岩性和环境磁学特征变化明显。且每个阶段开始和结束时的年代与实测年代-水深数据可以较好

地对应,因此,认为这些岩性和磁学特征显著变化的节点可以作为年代参考点^[16]。

我们认为3个钻孔底部水深为~15 m附近的岩性发生显著变化,且表现为侵蚀接触的界面,即各钻孔Unit I阶段开始的节点,可以作为1976年的参考点(如YD01孔11.35~11.28 m段,图6)。其次,水深为12~13 m附近 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{lf} 和 χ_{ARM} 略降低的界面,即3个钻孔Unit I和Unit II分界线,可以作为1986年的参考点(图6)。YD01孔附近水深为8~9 m之间, $\chi_{fd}\%$ 和 χ_{ARM} 显著升高,即Unit III阶段开始的节点可以作为~2002年调水调沙开始实施的参考点。而在YD02水深为~9 m和YD03孔附近水深为~12 m(两钻孔Unit III和Unit II的界面)处HIRM显著升高的阶段,也可以作为~2002年的参考点。之后,YD01孔附近水深~6 m、YD02孔水深~7 m以及YD03孔水深~11 m附近的 $\chi_{fd}\%$ 和 χ_{ARM} 显著降低,且岩性以粉细砂、细砂为主的节点,即Unit IV开始的节点,可以作为2007年左右的参考点。这些年代参考点根据岩性和环境磁学结果提出,在今后的研究中,还需要参考更多钻孔的环境磁学等研究结果进行验证。

4 结论

黄河口水下三角洲钻孔YD01、YD02和YD03的环境磁学和岩性特征清楚地记录了流域内水库拦沙、调水调沙、河流间尾摆动等自然和人类活动。1976~1996年间,3个钻孔沉积环境为三角洲前缘河口沙坝沉积环境,参数 $\chi_{fd}\%$ 和 χ_{ARM} 值较高,反映黄土高原物源输入丰富。1986年之后,3个钻孔的 $\chi_{fd}\%$ 和 χ_{ARM} 值降低,表明黄河泥沙输入略微减少,推测与龙羊峡水库建成后截沙明显有关。2002~2007年间,YD01孔的 $\chi_{fd}\%$ 和 χ_{ARM} 值显著升高,表明在调水调沙作用下,黄河物质输入增多。YD02和YD03孔附近,HIRM值升高,也反映了调水调沙、下游河床冲刷、粗颗粒磁性矿物贡献增多,但是该区域沉积物可能经过了侵蚀-再沉积的过程,导致细颗粒SD、SP磁性矿物含量减少。~2007年后,3个钻孔附近SD和SP等细颗粒磁性矿物含量显著降低,岩性以粉细砂为主,表明侵蚀作用较强。~2014年后,YD02和YD03孔磁性结果表明黄河泥沙输入再次增多,沉积物可能来源于现行黄河口的侵蚀-再搬运。YD01、YD02和YD03孔的磁性和岩性特征显著变化的界面,可能用来作为1976年以来黄河口附近钻孔沉积物的年代参考点,主要包括1976、1986、2002和2007年左右这4个年代参考点。

致谢 感谢审稿人对论文提出的修改意见.

参考文献

- 1 Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J Geol*, 1983, 91: 1–21
- 2 Wang H, Wu X, Bi N, et al. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review. *Glob Planet Change*, 2017, 157: 93–113
- 3 Chen S L, Gu S, Ji H Y, et al. Processes of the Yellow River Mouth on new water and sediment condition (in Chinese). *J Sediment Res*, 2019, 44: 61–67 [陈沈良, 谷硕, 姬泓宇, 等. 新入海水沙情势下黄河口的地貌演变. 泥沙研究, 2019, 44: 61–67]
- 4 Bi N, Wang H, Yang Z. Recent changes in the erosion-accretion patterns of the active Huanghe (Yellow River) delta lobe caused by human activities. *Cont Shelf Res*, 2014, 90: 70–78
- 5 Cheng G D, Ren Y C, Li S Q, et al. Channel evolution and sedimentary sequence of modern Huanghe River Delta (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 1986, 2: 3–17 [成国栋, 任于灿, 李绍全, 等. 现代黄河三角洲河道演变及垂向序列. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 2: 3–17]
- 6 Xue C T. Division and recognition of modern Yellow River Delta lobes (in Chinese). *Geog Res*, 1994, 13: 59–66 [薛春江. 现代黄河三角洲叶瓣的划分和识别. 地理研究, 1994, 13: 59–66]
- 7 Bi N, Yang Z, Wang H, et al. Sediment dispersion pattern off the present Huanghe (Yellow River) subdelta and its dynamic mechanism during normal river discharge period. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2010, 86: 352–362
- 8 Li G X, Cheng G D, Wei H L, et al. Shear zone of flow field in the present Yellow River Mouth (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1994, 39: 928–932 [李广雪, 成国栋, 魏合龙, 等. 现代黄河口区流场切变带. 科学通报, 1994, 39: 928–932]
- 9 Wang H J, Yang Z S, Bi N S, et al. Rapid shifts of the river plume pathway off the Huanghe (Yellow) River mouth in response to water-sediment regulation scheme in 2005 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2005, 23: 2656–2662 [王厚杰, 杨作升, 毕乃双, 等. 2005年黄河调水调沙期间河口入海主流的快速摆动. 科学通报, 2005, 23: 2656–2662]
- 10 Wu X, Bi N, Xu J, et al. Stepwise morphological evolution of the active Yellow River (Huanghe) delta lobe (1976–2013): Dominant roles of riverine discharge and sediment grain size. *Geomorphology*, 2017, 292: 115–127
- 11 Zhou L, Liu J, Saito Y, et al. Modern sediment characteristics and accumulation rates from the delta front to prodelta of the Yellow River (Huanghe). *Geo-Mar Lett*, 2016, 36: 247–258
- 12 Wang W Z, Zhou L Y, Duan Z Q, et al. Magnetostratigraphic framework and magnetic properties of modern sediment in the Yellow River Delta (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2019, 62: 206–222 [王琬璋, 周良勇, 段宗奇, 等. 现代黄河三角洲沉积物磁性地层年代框架及环境磁学研究. 地球物理学报, 2019, 62: 206–222]
- 13 Han X J, Chen S L, Fu Z M, et al. Spatiotemporal evolution of erosion and deposition in the Yellow River submerged delta and its influencing factors (in Chinese). *Mar Sci Bull*, 2020, 39: 567–580 [韩香举, 陈沈良, 付作民, 等. 现行黄河口滨海区冲淤时空演变及其影响因素. 海洋通报, 2020, 39: 567–580]
- 14 Jiang C, Chen S, Pan S, et al. Geomorphic evolution of the Yellow River Delta: Quantification of basin-scale natural and anthropogenic impacts. *Catena*, 2018, 163: 361–377
- 15 Wang H, Bi N, Saito Y, et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary. *J Hydrol*, 2010, 391: 302–313
- 16 Xue C T, Ye S Y, Gao M S, et al. Determination of depositional age in the Huanghe Delta in China (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2009, 31: 117–124 [薛春江, 叶思源, 高茂生, 等. 现代黄河三角洲沉积物沉积年代的确定. 海洋学报, 2009, 31: 117–124]
- 17 Liu Q S, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: Principles and applications. *Rev Geophys*, 2012, 50: RG4002
- 18 Chen T, Wang Z H, Qiang X K, et al. Mineral magnetic properties and late Quaternary transgressions recorded by the Borehole WJ in the Taihu Plain, China. *Chin J Geophys*, 2013, 56: 647–660
- 19 Pan D D, Wang Z H, Chen T, et al. Mineral magnetic characteristics of surficial sediments and their implications for identifying sedimentary environments at the Changjiang River mouth (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2015, 37: 101–111 [潘大东, 王张华, 陈艇, 等. 长江口表层沉积物矿物磁性分区特征及其沉积环境表明意义. 海洋学报, 2015, 37: 101–111]
- 20 Wang F, Zhang W, Nian X, et al. Magnetic evidence for Yellow River sediment in the late Holocene deposit of the Yangtze River Delta, China. *Mar Geol*, 2020, 427: 106274
- 21 Wang Z H, Li M T, Zhang R H, et al. Impacts of human activity on the late-Holocene development of the subaqueous Yangtze Delta, China, as shown by magnetic properties and sediment accumulation rates. *Holocene*, 2011, 21: 393–407
- 22 Chen T, Wang Z, Wu X, et al. Magnetic properties of tidal flat sediments on the Yangtze coast, China: Early diagenetic alteration and implications. *Holocene*, 2015, 25: 832–843

- 23 Liu X J, Wang Y H, Li G X, et al. Stratigraphy evolution of the Diaokou Lobe Area in the Huanghe Delta since Holocene: Implication from grain size and magnetic properties (in Chinese). *Acta Sediment Sin*, 2014, 32: 518–526 [刘修锦, 王永红, 李广雪, 等. 基于磁学和粒度参数的黄河三角洲刁口叶瓣地区全新世以来的地层演化. *沉积学报*, 2014, 32: 518–526]
- 24 Peng J, Chen H Q, Ma S S, et al. Magnetic properties of sediment and sedimentary environment in tidal flat of the Yellow River Delta (in Chinese). *Sci Geog Sin*, 2014, 34: 1262–1269 [彭俊, 陈洪全, 马随随, 等. 黄河三角洲潮滩沉积物磁性特征与沉积环境分析. *地理科学*, 2014, 34: 1262–1269]
- 25 Wang Y H, Zhang W G, Liu X J, et al. Formation of greigite under different climate conditions in the Yellow River delta. *Sci China Earth Sci*, 2015, 58: 300–308 [王永红, 张卫国, 刘修锦, 等. 黄河三角洲不同气候条件下沉积物中胶黄铁矿的形成. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 2193–2201]
- 26 Li Y, Zhang H, Tu C, et al. Magnetic characterization of distinct soil layers and its implications for environmental changes in the coastal soils from the Yellow River Delta. *Catena*, 2018, 162: 245–254
- 27 Dunlop D J, Özdemir Ö. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 28 Deng C, Zhu R, Jackson M J, et al. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese Loess Plateau: A pedogenesis indicator. *Phys Chem Earth Pt A-Solid Earth Geod*, 2001, 26: 873–878
- 29 Roberts A P, Pike C R, Verosub K L. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *J Geophys Res*, 2000, 105: 461–428
- 30 Dunlop D J. Theory and application of the Day plot (M_{ts}/M_s versus H_{cr}/H_c) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils. *J Geophys Res*, 2002, 107: 2057
- 31 Qin H F, Liu Q S, Pan Y X. The first-order reversal curve (FORC) diagrams: Theory and case study (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2008, 51: 743–751 [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. *地球物理学报*, 2008, 51: 743–751]
- 32 Ren M E, Shi Y L. Sediment discharge of the Yellow River and its effect on sedimentation of the Bohai and Yellow Sea (in Chinese). *Sci Geog Sin*, 1986, 6: 1–12 [任美镠, 史运良. 黄河输沙及其对渤海、黄海沉积作用的影响. *地理科学*, 1986, 6: 1–12]
- 33 Deng C L, Liu Q S, Pan Y X, et al. Environmental magnetism of Chinese Loess-Paleosol sequences (in Chinese). *Quat Sci*, 2007, 27: 193–209 [邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究, 2007, 27: 193–209]
- 34 Maher B A, Thompson R. Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols. *Geology*, 1991, 19: 3–6
- 35 Chen T, Qiang X, Zhao H, et al. An investigation of the magnetic carriers and demagnetization characteristics of the Gulang loess section, northwestern Chinese Loess Plateau. *Geochem Geophys Geosyst*, 2014, 15: 1600–1616
- 36 Deng C, Shaw J, Liu Q, et al. Mineral magnetic variation of the Jingbian loess/paleosol sequence in the northern Loess Plateau of China: Implications for Quaternary development of Asian aridification and cooling. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 241: 248–259
- 37 Wang Q, Cao L H, Yang Z S, et al. Dynamic sedimentary characteristics in the subaqueous Yellow River Delta (in Chinese). *Sci China B*, 1991, (6): 659–665 [王琦, 曹立华, 杨作升, 等. 黄河水下三角洲的动力沉积特征. *中国科学B辑*, 1991, (6): 659–665]

补充材料

图S1 YD01、YD02和YD03三个钻孔代表性样品Day图

图S2 YD02孔代表性样品 κ -T曲线、Loop曲线、IRM获得曲线和FORC图

图S3 YD03孔代表性样品 κ -T曲线、Loop曲线、IRM获得曲线和FORC图

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “黄河水下三角洲钻孔沉积物磁学记录及其年代学意义”

Environmental magnetic properties of core sediments in the Yellow River subaqueous delta and their chronological applications

Ting Chen¹, Qingsong Liu^{2,3*} & Yi Zheng^{4*}

¹ Chongqing Key Laboratory of Earth Surface Processes and Environmental Remote Sensing in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

² Centre for Marine Magnetism, Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;

³ Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

⁴ School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

* Corresponding authors, E-mail: qslu@sustech.edu.cn; zhengy@sustech.edu.cn

The Yellow River has shifted frequently in the downstream region since 1885; it has flowed into the sea through the Qingshuigou channel from 1976 onward, thus forming the latest delta lobe (1976–present). During the past ~40 years, the sediment load of the Yellow River has been greatly reduced because of human and natural activities, such as reservoir construction, soil and water conservation, and river avulsion. Beginning in 2002, the water-sediment regulation scheme (WSRS) has also changed the sediment loading patterns of the Yellow River. Several studies have reported on the erosion and deposition characteristics of the latest lobe of the Yellow River Delta over the past several decades, based on remote sensing methods and water-depth measurements. However, continuous sedimentary records of delta erosion and deposition and their responses to natural and human activities in the watershed are lacking. Here, we obtained three sediments cores, YD01, YD02, and YD03, from the subaqueous delta of the latest lobe of the Yellow River Delta. These cores contain sediments deposited from 1976 to 2018. We analyzed the environmental magnetism and lithological characteristics of these cores, and investigated their responses to natural and human activities in the watershed of the Yellow River, as well as possible applications to sediment dating in the Yellow River Delta. The results show that frequency-dependent susceptibility ($\chi_{fd}\%$) and anhysteretic remanent magnetization susceptibility (χ_{ARM}) values were high in core sediments deposited from 1976 to 1996, indicating abundant contents of fine single-domain (SD) and superparamagnetic (SP) magnetic particles, and therefore a dominant sediment supply from the Chinese Loess Plateau. Small decreases in $\chi_{fd}\%$ and χ_{ARM} in sediments deposited after 1986 revealed slight reduction of the sediment load from the Yellow River, which was likely caused by sediment retention related to the construction of the Longyangxia Reservoir. Rapid rises in $\chi_{fd}\%$ and χ_{ARM} occurred in core YD01 sediments deposited during 2002 and ~2007, likely in response to the implementation of the WSRS, which resulted in an increase in sediment transportation. Increases in hard isothermal remanent magnetization (HIRM) values, an indicator of high-coercivity magnetic minerals such as goethite and hematite, in cores YD02 and YD03 from 2002 to ~2007 may also represent the start of the WSRS. This is because the downstream riverbed of the Xiaolangdi Reservoir underwent intense erosion during the implementation of the WSRS, leading to large-scale transportation of coarse sediments enriched in goethite and hematite, which were deposited on the riverbed before the implementation of the WSRS. The lack of increased contents of fine SD and SP magnetic minerals in cores YD02 and YD03 compared with YD01 in the interval deposited between 2002 and ~2007 was attributed to erosion and redeposition in the areas around cores YD02 and YD03. Large drops in SD and SP contents after ~2007 were detected in all three cores, revealing intense erosion near the river mouth likely caused by river channel shift and reduced capability of the WSRS to remove sediments. Contents of SD and SP particles increased again in sediments deposited after 2014 in cores YD02 and YD03, likely related to erosion of the present (after 1996) Yellow River mouth and transportation of fine particles to the region near cores YD02 and YD03. In summary, the magnetic parameters $\chi_{fd}\%$ and χ_{ARM} and the lithological characteristics of cores YD01, YD02, and YD03 recorded sediment delivery changes caused by four events in the Yellow River watershed: The main river channel shift in 1976, construction of the Longyangxia Reservoir in 1986, the beginning of the WSRS in 2002, and weakened capability of the WSRS to remove sediments after ~2007. The notable changes of $\chi_{fd}\%$, χ_{ARM} , and lithology at the 1976, 1986, 2002, and ~2007 horizons may be used as dating points in future research of sediment cores from the Yellow River Mouth.

the Yellow River Delta, water-sediment regulation scheme, environmental magnetism, the Yellow River channel shifts, sediment sources

doi: [10.1360/TB-2021-0528](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0528)