

文章编号:1000-5641(2008)06-0024-08

# 长江中下游河流沉积物磁性特征初探

周立旻, 郑祥民, 王辉, 王晓勇, 黄东锋, 宋连环, 任少芳  
(华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 通过多参数磁性测量分析, 探讨长江中下游干、支流河流沉积物的磁性特征, 为研究长江水沙环境积累基础资料. 研究表明, 长江中下游干、支流河流沉积物中, 磁性矿物类别均以磁铁矿为主, 晶粒均以假单畴-多畴为主. 与干流相比, 支流沉积物中不完整反铁磁性物质含量较多, 晶粒较细,  $\chi$  值仅是干流的 1/10. 随着支流泥沙的汇入, 入江口以下江段沉积物的磁性特征相应发生变化. 支流泥沙物源贡献的研究是探讨长江中下游干流沉积物环境特征的主要因子.

**关键词:** 环境磁学; 沉积物; 长江中下游

**中图分类号:** P318 **文献标识码:** A

## Magnetic properties of sediments in the middle and lower reaches of the Yangtze River

ZHOU Li-min, ZHENG Xiang-min, WANG Hui, WANG Xiao-yong,  
HUANG Dong-feng, SONG Lian-huan, REN Shao-fang  
(Key Laboratory of Geographic Information Science of Ministry of Education,  
East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The environmental magnetic properties of sediments from the middle and lower reaches of the Yangtze River were investigated for the study of environmental information of Yangtze River basin. The results show that magnetic properties of the sediments in both the mainstream and tributaries are affected by ferrimagnetic magnetite, with the magnetic domain being pseudo single domain (PSD) - multi-domain (MD). Compared with the sediments of the mainstream, the contents of imperfect anti-ferromagnetic material are higher and ferrimagnetic mineral particles are finer in those of the tributaries. With material from the tributaries into the mainstream, magnetic properties of sediments in the estuary and lower reaches of the Yangtze River change correspondingly. The contribution of the tributary sources may be the main factor controlling the regional differences of sedimentary magnetic properties in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

**Key words:** environmental magnetism; sediment; the middle and lower reaches of the Yangtze River

收稿日期:2008-04

基金项目:上海市优秀学科带头人项目(07XD14010);上海市科技委重大项目(07DZ12038)

第一作者:周立旻,男,博士生. E-mail: zhoulim@gmail.com.

通讯作者:郑祥民,男,教授,博士生导师. E-mail: zhengxm8@yahoo.com.cn.

## 0 引 言

利用河流沉积物磁性特征进行物源识别<sup>[1-3]</sup>、沉积环境信息提取<sup>[4-7]</sup>和环境污染评价<sup>[8-10]</sup>是环境磁学的重要应用领域之一。磁性特征一般通过磁性矿物的含量、类型和颗粒大小等因子来反映,这些因子与沉积物的物源、搬运迁移、沉积动力以及沉积后次生变化等有关,因此沉积物磁性特征蕴含了丰富的环境信息<sup>[1,11]</sup>。多年来,学者曾对长江沉积物的磁性特征进行过探讨,但研究主要集中在长江口<sup>[6,12,13]</sup>及干流的局部城市或区域<sup>[7,11]</sup>,以整体流域为对象的系统研究相对薄弱。

长江中下游始自宜昌,经湖北、湖南、江西、安徽、江苏和上海等六省市入东海,全长1893 km。受区域地貌及地质构造控制,长江中下游支流众多,北岸较大支流有汉江、巢湖和大运河,南岸有清江、洞庭湖水系及鄱阳湖水系等。支流为干流源源不断输送了泥沙物源,支流沉积物的磁性特征不可避免会对干流有较大影响。本文在研究长江中下游干流、支流沉积物磁性特征差异的基础上,以南岸支流洞庭湖区域为例,探讨沿江支流对长江中下游干流沉积物的磁性贡献,为研究长江流域水沙环境积累基础资料。

## 1 样品与方法

沉积物样品采自2006年10-11月,正值长江特枯水年和三峡水库开始156 m蓄水。干流采样点一般选择在城市江段河道中泓,尽量避开人为污染影响;支流采样点主要选择洞庭湖区域,同时采集了汉江、鄱阳湖、巢湖样品(见图1)。干流样品平均砂粒( $>63 \mu\text{m}$ )含量为77.2%,颗粒整体较粗;支流样品相对较细,粘土( $<4 \mu\text{m}$ )含量平均为41.1%,砂粒含量仅为3.9%。采样方式为抓斗式采样器,用塑料小铲取其中央未受干扰的表层沉积物分别置入可密封的聚乙烯塑料袋中。将所有沉积物在低温下烘干研磨后,过120目尼龙筛后测磁。

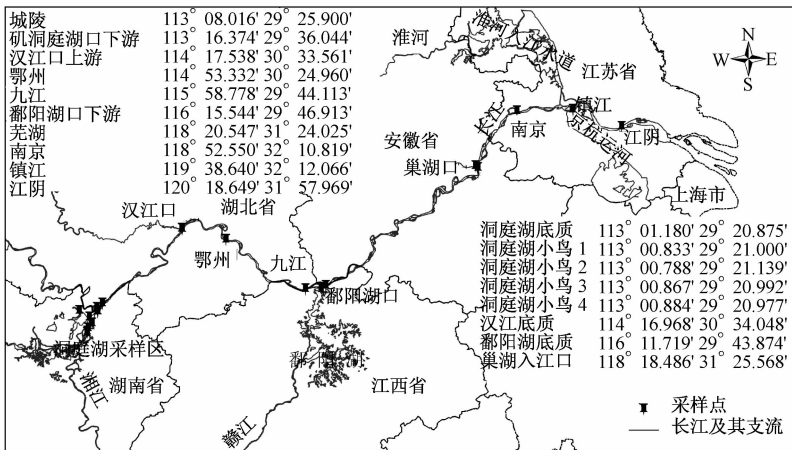


图1 长江中下游干支流沉积物采样点图

Fig. 1 Sampling sites in the middle and lower channel of the Yangtze River

采用 Bartington MS<sub>2</sub> 磁化率仪测量低频磁化率(0.47 kHz)和 高频磁化率(4.7 kHz)。使用 Molspin 交变退磁仪和 Minispin 旋转磁力仪测量在 0.04 mT 的直流磁场和 100 mT 的交变磁场峰值下获得的非滞后剩磁 ARM; 随后用 Molspin 脉冲磁化仪和 Minispin 旋转磁力仪测量在 1 T 磁场下获得的饱和等温剩磁 SIRM, 再在其反方向依次加 -100 mT、-300

mT 磁场获得的等温剩磁. 根据测量结果, 分别计算磁化率  $\chi$ ; 频率磁化率  $\chi_{fd} \%$ ; 非滞后剩磁磁化率  $\chi_{ARM}$ ; 饱和等温剩磁 SIRM; 软剩磁 Soft; 硬剩磁 HIRM; 退磁参数  $S_{-100}$  mT,  $S_{-300}$  mT, 以及各比值参数如  $SIRM/\chi$ ,  $\chi_{ARM}/\chi$ ,  $\chi_{ARM}/SIRM$  等, 并据此制作各磁性参数及比值参数曲线图. 各磁参数具体计算方法、单位及矿物学涵义可参考文献<sup>[14,15]</sup>.

根据上述测试结果, 选择洞庭湖入江口下游(干流中游)、江阴(干流下游)及洞庭湖底质和洞庭湖小岛 2(支流)4 个典型性样品, 利用 MMVFTB 进行了磁滞回线、IRM 退磁曲线和热磁曲线的测量, 从而获得饱和磁化强度( $M_s$ )、饱和剩磁( $M_{rs}$ )、矫顽力( $B_c$ )、剩磁矫顽力( $B_{cr}$ )以及居里温度等参数. 其中根据磁滞回线 700~1 000 mT 之间的直线段进行了顺磁性矿物贡献校正; 热磁曲线的测定是在空气中加热与冷却, 磁场强度为 34 mT, 升温速率为 60 °C/min.

## 2 结 果

### 2.1 干流沉积物磁性特征

$S_{-100}$  和  $S_{-300}$  反映样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿)与不完整反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)的相对比例, 它们随着不完整反铁磁性矿物的比例增加而下降<sup>[1,16]</sup>. 干流沉积物中, 各样点的  $S_{-300}$  均在 94% 以上(见表 1), 即经 -300 mT 磁场磁化后, 样品所携剩磁已接近饱和, 说明亚铁磁性矿物主导了沉积物的磁性特征, 同时存在少量不完整反铁磁性物质的贡献. 干流典型样品的磁滞回线(见图 2a 和 2b)均在 200 mT 即已形成闭合, 也表明低矫顽力的亚铁磁性矿物主导了样品的磁滞行为. 热磁曲线显示的居里温度也证实了这点. 典型样品的热磁曲线见图 3a 和 3b, 均在 580 °C 附近出现急剧转折, 显示出磁铁矿的居里温度<sup>[1]</sup>. 以上各磁性参数均表明, 亚铁磁性矿物磁铁矿主导了干流沉积物的磁性特征.

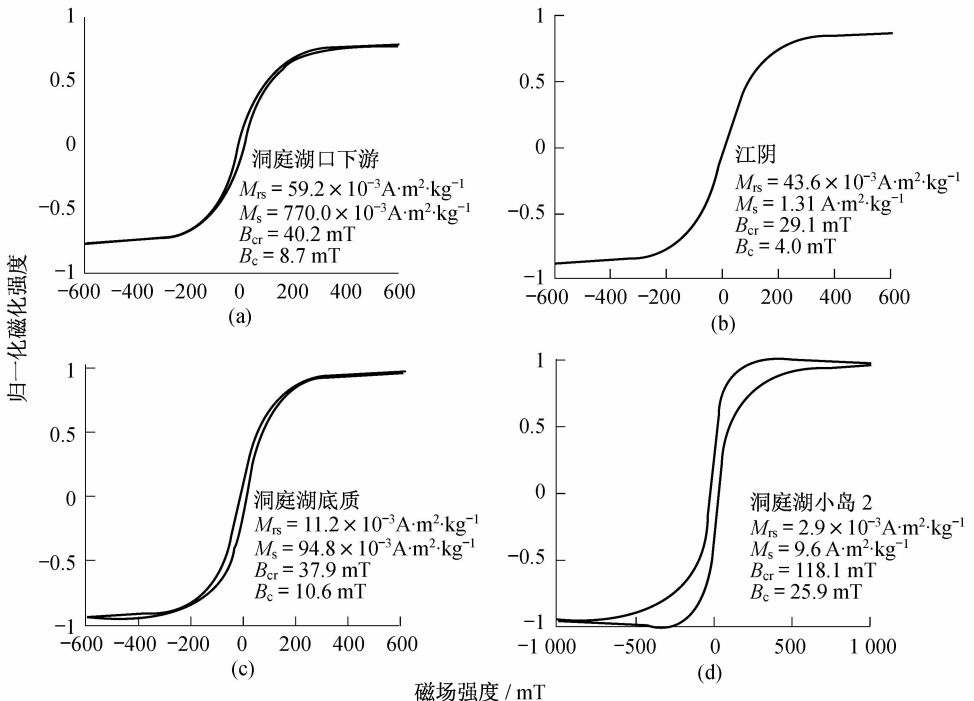


图 2 典型样品的磁滞回线

Fig. 2 Magnetic hysteresis loops of four typical sediments

$\chi$  反映样品中磁性矿物总含量;SIRM 反映亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物含量,与  $\chi$  不同的是,SIRM 不受顺磁性、抗磁性矿物的影响;HIRM 反映不完整反铁磁性矿物的含量<sup>[1,2]</sup>. 干流沉积物中, $\chi$  的变化范围为  $105 \times 10^{-8} \sim 885 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均值为  $641 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与长江口相比<sup>[6,17]</sup>,总体偏高 10 倍,指示样品中磁性矿物含量总体较高;SIRM 的变化范围为  $11\ 352 \times 10^{-6} \sim 53\ 291 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均值  $37\ 291 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,总体也较长江口高 3 倍,指示样品中亚铁磁性矿物含量较高(见表 1).

表 1 长江中下游河道沉积物磁性测量结果

Tab. 1 Main magnetic properties of samples in the middle and lower channel of the Yangtze River

采样点	$\chi / (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	SIRM / $(10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	$\chi_{\text{fd}} / \%$	$\chi_{\text{ARM}} / (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	HIRM / $(10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	SIRM/X $(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	$\chi_{\text{ARM}} / \chi$	$\chi_{\text{ARM}} / \text{SIRM} (10^{-5} \text{ mA}^{-1})$	$S_{-100} / \%$	$S_{-300} / \%$	
洞庭湖口上游	771.10	66 611.01	3.67	614.67	2 359.54	8.64	0.80	9.23	82.31	96.46	
城陵矶	104.56	11 352.06	4.71	349.46	624.20	10.86	3.34	30.78	82.77	94.50	
洞庭湖口下游	468.04	53 290.94	2.08	423.69	1 892.89	11.39	0.91	7.95	81.30	96.45	
汉江口上游	782.74	46 341.53	0.71	384.33	1 922.32	5.92	0.49	8.29	84.39	95.85	
鄂州	884.89	48 788.89	1.98	424.80	1 766.56	5.51	0.48	8.71	85.45	96.38	
干流河道(中泓)	九江	774.48	40 634.55	1.53	372.86	1 523.00	5.25	0.48	9.18	86.63	96.25
鄱阳湖口下游	695.95	37 342.05	1.36	345.72	1 203.90	5.37	0.50	9.26	84.05	96.78	
芜湖	590.66	36 845.03	3.34	369.35	1 298.04	6.24	0.63	10.02	84.97	96.48	
南京	872.39	39 699.13	2.10	373.50	1 242.06	4.55	0.43	9.41	88.54	96.87	
镇江	562.41	27 099.72	0.94	276.25	667.72	4.82	0.49	10.19	88.66	97.54	
江阴	675.63	31 517.90	1.55	296.35	1 147.30	4.66	0.44	9.40	88.00	96.36	
极大值	884.89	53 290.94	4.71	424.80	1 922.32	11.39	3.34	30.78	88.66	97.54	
极小值	104.56	11 352.06	0.71	276.25	624.20	4.55	0.43	7.95	81.30	94.50	
平均值	641.17	37 291.18	2.03	361.63	1 328.80	6.46	0.82	11.32	85.48	96.35	
洞庭湖区域	洞庭湖底质	96.56	11 743.13	3.70	389.37	653.07	12.16	4.03	33.16	83.07	94.44
洞庭湖畔	21.51	3 558.24	-0.71	79.02	770.00	16.54	3.67	22.21	61.42	78.36	
洞庭湖小島 1	15.93	2 428.14	-2.04	62.59	857.97	15.24	3.93	25.78	42.55	64.67	
洞庭湖小島 2	17.98	2 649.21	-0.45	92.80	700.00	14.74	5.16	35.03	45.30	73.58	
洞庭湖小島 3	19.22	2 925.05	-0.74	96.40	840.17	15.22	5.02	32.96	51.71	71.28	
洞庭湖小島 4	20.13	3 138.71	0.00	103.20	839.13	15.59	5.13	32.88	55.33	73.27	
城陵矶水边样	41.43	6 003.89	2.73	188.85	822.84	14.49	4.56	31.46	72.04	86.29	
城陵矶岸上土	110.47	17 689.28	3.76	454.53	921.15	16.01	4.11	25.70	82.83	94.79	
极大值	110.47	17 689.28	3.76	454.53	921.15	16.54	5.16	35.03	83.07	94.79	
极小值	15.93	2 428.14	-2.04	62.59	653.07	12.16	3.67	22.21	42.55	64.67	
平均值	42.91	6 266.96	0.78	183.35	800.54	15.00	4.45	29.89	61.78	79.58	
其它支流	汉江底质	163.64	18 261.77	0.36	272.28	525.31	11.16	1.66	14.91	88.79	97.12
鄱阳湖底质	156.19	21 324.73	3.32	573.26	821.14	13.65	3.67	26.88	88.59	96.15	
巢湖入江口	59.42	6 558.95	4.81	301.14	733.00	11.04	5.07	45.91	79.60	88.82	

$\chi_{\text{fd}} / \%$  反映了超顺磁(SP,  $< 0.03 \mu\text{m}$ )与单畴(SD,  $0.04 \sim 0.06 \mu\text{m}$ )界限附近的细粘滞性超顺磁颗粒(约  $0.03 \mu\text{m}$ )对磁化率的贡献<sup>[1]</sup>. 干流沉积物的  $\chi_{\text{fd}} / \%$  不超过 5%, 平均值为 2%, 指示了超顺磁性颗粒 SP 含量较低, 对磁化率的贡献很小. 比值参数  $\chi_{\text{ARM}} / \chi$  和  $\chi_{\text{ARM}} / \text{SIRM}$  常被用作指示磁性矿物颗粒的大小, 高值反映较细的单畴颗粒, 低值指示较粗的多畴颗粒<sup>[14,18]</sup>. 干流沉积物的  $\chi_{\text{ARM}} / \chi$  均小于 4,  $\chi_{\text{ARM}} / \text{SIRM}$  小于  $31 \times 10^{-5} \text{ mA}^{-1}$ , 指示了晶粒以假单畴(PSD)-多畴(MD)为主<sup>[15]</sup>. Day 氏图也证实这点(见图 4). 以饱和剩磁与饱和磁化强度

的比值为纵坐标( $M_{rs}/M_s$ )、剩磁矫顽力与矫顽力的比值( $B_{cr}/B_c$ )为横坐标的 Day 氏图<sup>[19]</sup>, 典型样品均落在 PSD - MD 区域内, 也表明晶粒以假单畴-多畴为主.

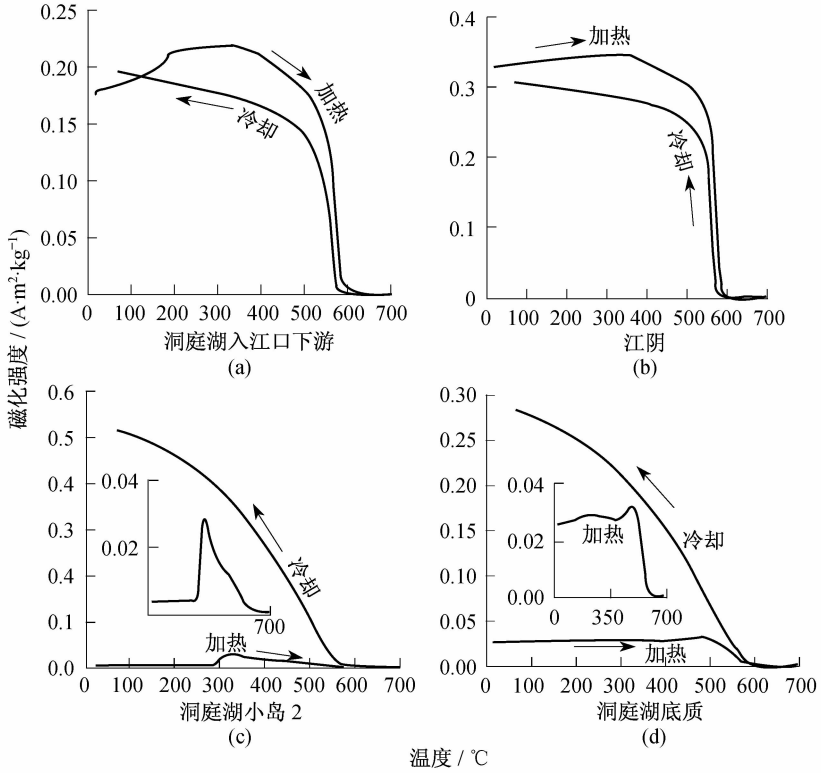


图 3 典型样品热磁曲线(图中小插图只显示了加热曲线)

Fig. 3 Thermomagnetic curves of four typical sediments(The insets display the heating curve only)

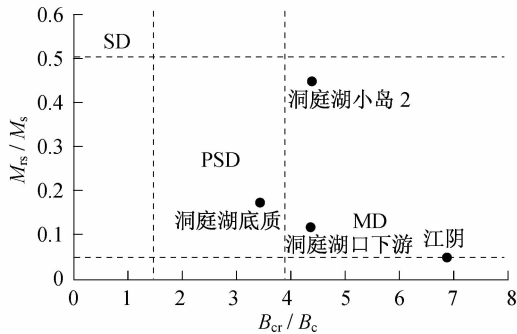


图 4 典型样品的 Day 氏图

Fig. 4 Hysteresis ratios plotter on a Day diagram of four typical sediments

从表 1 可见,干流沉积物中,城陵矶的磁性特征明显与其它样点有较大不同, $\chi$  和 SIRM 低得多, $\chi_{fd}\%$ 、 $\chi_{ARM}/\chi$  和  $\chi_{ARM}/SIRM$  相对较高,这是由于城陵矶样点位于洞庭湖入江口处,可能受到洞庭湖泥沙入江的影响.

### 2.2 支流沉积物磁性特征

支流沉积物的磁性特征主要以长江南岸洞庭湖区域为例进行探讨.洞庭湖区域包括洞

洞庭湖底质、洞庭湖畔、洞庭湖4个小岛和城陵矶水边样、城陵矶岸上表土8个样点。

典型样品的热磁曲线证实,洞庭湖区域沉积物和干流沉积物一样,也以亚铁磁性矿物磁铁矿为主导,不同的是前者不完整反铁磁性物质含量较高(见图3c和3d)。当温度接近580℃的时候,热磁曲线出现明显的转折,显示磁铁矿为主要的磁性矿物,与干流沉积物相同;不同的是,样品冷却到室温后的磁化强度要高于加热前的初始值,指示了加热过程使样品中弱磁性矿物向强磁性矿物(如亚铁磁性矿物)转变。洞庭湖区域的 $S_{-300}$ 在65%~86%之间(除洞庭湖底质和城陵矶岸上表土外),也指示样品中存在较多的不完整反铁磁性物质(见表1)。反映在磁性矿物含量上,洞庭湖区域和干流沉积物呈现出显著不同。如前者 $\chi$ 的变化范围为 $16 \times 10^{-8} \sim 110 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均值为 $43 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,较后者小10多倍;前者的SIRM的变化范围为 $2\,428 \times 10^{-6} \sim 17\,689 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,也较后者小得多。

洞庭湖区域沉积物的 $\chi_{\text{fd}}\%$ 平均值仅为0.78%,指示SP含量较低; $\chi_{\text{ARM}}/\chi$ 均小于5, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 小于 $35 \times 10^{-5} \text{ mA}^{-1}$ ,指示晶粒以PSD-MD为主(见表1)。但洞庭湖区域的 $\chi_{\text{ARM}}/\chi$ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 比干流沉积物大得多,指示前者晶粒相对较细。洞庭湖区域典型样品的Day氏图也证实了这点(见图4)。

洞庭湖区域典型样品的磁滞回线可分为两种类型(见图2c和2d)。洞庭湖底质的磁滞回线在200 mT即已闭合,剩磁矫顽力为37.9 mT,表明样品以亚铁磁性矿物为主导。而洞庭湖小岛2的磁滞回线呈现蜂腰形特征,这有两种可能,一是不同颗粒大小的亚铁磁性矿物混合所致,二是不同矫顽力磁性矿物所致<sup>[11,20]</sup>。由于SP颗粒很少,因而SP与SD颗粒混合产生蜂腰型磁滞回线特征的可能不大,应是反映了不同矫顽力磁性矿物的混合特征。这也指示了洞庭湖小岛2中除亚铁磁性矿物外,还含有较多的不完整反铁磁性矿物。

汉江、鄱阳湖、巢湖支流样品的磁性特征与洞庭湖区域相似(见表1),长江中下游干、支流沉积物磁性矿物类型、含量和晶粒的差异,反映了两者物质来源的不同。

### 3 讨 论

对水环境中的碎屑沉积物而言,影响其磁性特征的因素主要有物源、沉积动力以及沉积后的次生变化等因素<sup>[1]</sup>。长江中下游干流沉积物磁性特征的不同,除了上游带来的河流沉积物和中下游沿江两岸不同岩石背景的因素外,众多支流泥沙的汇入,使入江口及其下游江段沉积物的物源发生变化,不可避免会对沉积物的磁性特征产生影响。长江上游特别是川西和青藏高原地区分布有大量新生代岩浆岩,有的岩体含有大量的铁磁性矿物,中下游以沉积岩发育为主,长江上游岩石的铁磁矿物含量明显大于三峡以下各支流<sup>[21]</sup>,所以上游带来的河流沉积物的磁性强于中下游支流沉积物的磁性。图5为南岸支流洞庭湖水系入江口区域干、支流磁性图对比,该区域指示磁性矿物含量指标 $\chi$ ,SIRM与SOFT变化特征相似,指示晶粒指标 $\chi_{\text{ARM}}/\chi$ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 特征图相似,故仅给出 $\chi$ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 的特征图。从图可见,干、支流的磁性特征具有明显不同,干流沉积物的磁化率含量远高于、晶粒远粗于支流,可能是由于支流沉积物中不完整反铁磁性物质较多,不完整反铁磁性矿物的 $\chi$ 值比亚铁磁性矿物的 $\chi$ 值小100~1 000倍<sup>[1]</sup>,所以支流的 $\chi$ 值远低于干流。干流沉积物3个样点中,城陵矶地处入江口, $\chi$ 值远远低于而 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 值明显大于洞庭湖口上、下游,表明城陵矶样点的磁性特征明显受到洞庭湖泥沙的影响。其它支流如鄱阳湖底质与鄱阳湖口上下游等也呈现同样的特征。物源不同可能是长江中下游干流沉积物磁性地区差异的主导因素之一,支

流泥沙物源贡献的研究是探讨长江中下游干流沉积物环境特征的主要因子。

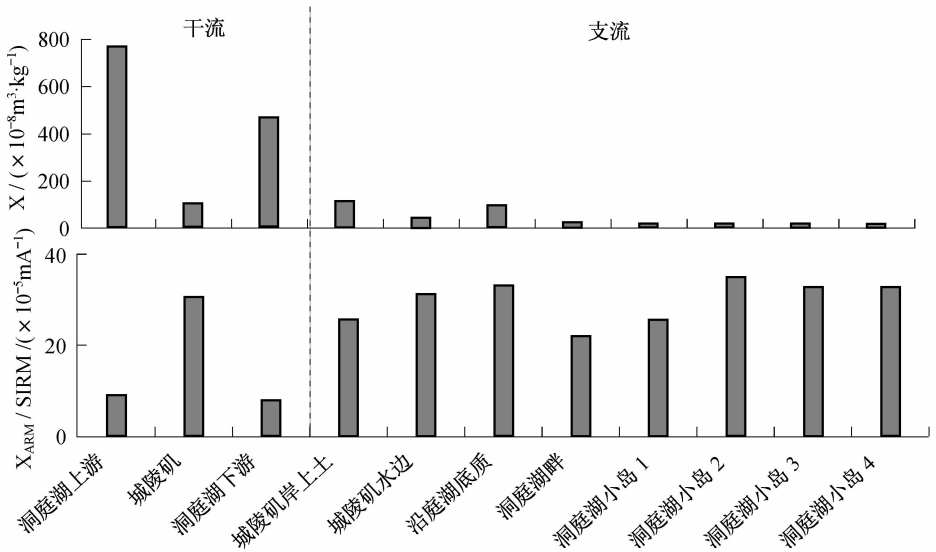


图5 干支流磁性特性对比

Fig. 5 Comparative magnetic characters between the mainstream and the tributaries

#### 4 小 结

长江中下游干、支流沉积物磁性矿物类别均以磁铁矿为主,同时存在少量不完整反铁磁性物质;晶粒以假单畴-多畴为主,超顺磁性颗粒含量较低.与干流相比,支流沉积物中不完整反铁磁性物质含量相对较多, $\chi$ 值仅是1/10;晶粒相对较细.随着众多支流泥沙的入江,入江口下游河段沉积物相应出现磁化率降低,晶粒变细.物源不同可能是长江中下游干流沉积物磁性地区差异的主导因素之一,支流泥沙物源贡献的研究是探讨长江中下游干流沉积物环境特征的主要因子。

#### [参 考 文 献]

- [1] THOMPSON R, OLDFIELD F. Environmental Magnetism[M]. London: Allen & Unwin, 1986.
- [2] EVANS M, HELLER F. Environmental Magnetism [M]. London: Academic Press, 2003.
- [3] YU L, OLDFIELD F. A multi-variant mixing model for identifying sediment source from magnetic measurements [J]. Quaternary Research, 1989, 32: 168-181
- [4] VEROSUB K L, ROBERTS A P. Environmental magnetism: past, present, and future[J]. J Geophys Res, 1995, 100 (B2): 2175-2192.
- [5] DEKKERS M J. Environmental magnetism: an introduction[J]. Geologie en Mijnbouw, 1997, 76: 163-182.
- [6] 张卫国, 贾铁飞, 陆敏, 等. 长江口水下三角洲 Y7 柱样磁性特征及其影响因素[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1063-1071.  
ZHANG W G, JIA T F, LU M, et al. Magnetic properties of core Y7 from subaqueous delta of the Changjiang Estuary and their influencing factors[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(6): 1063-1071.
- [7] 曹希强, 郑祥民, 周立旻, 等. 洪湖沉积物的磁性特征及其环境意义[J]. 湖泊科学, 2004, 16(3): 227-232.  
GAO X Q, ZHENG X M, ZHOU L M, et al. Paleoenvironmental implication of magnetic measurements on sediments core from Honghu lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(3): 227-232.

- [8] 俞立中,张卫国. 利用磁信息研究潮滩重金属污染的探讨[J]. 环境科学进展,1993,1(5):37-44.  
YU L Z, ZHANG W G. Discussion on the pollution reserch of heavy metal of the tidal beach using magnetic information[J]. Advance in Environmental Science, 1993,1(5):37-44.
- [9] 闫海涛,朱育新,胡守云,等. 西苜河流域重金属污染磁学研究及多元分析[J]. 中国环境科学,2004,24(4):385-389.  
YAN H T, ZHU Y X, HU S Y, et al. Magnetic studies on heavy metal pollution and multivariate analysis in West Tiaoxi Basin[J]. China Environmental Science, 2004,24(4): 385-389.
- [10] 吕达,郑祥民,周立旻,等. 崇明东滩湿地沉积物重金属污染的磁诊断[J]. 环境科学研究,2007,20(6):38-43.  
LÜ D, ZHENG X M, ZHOU L M, et al. Magnetic diagnosis of heavy metal pollution in sediments of Chongming wetland[J]. Research of Environmental Sciences, 2007,20(6): 38-43.
- [11] 张卫国,戴雪荣,张富瑞,等. 近7000年巢湖沉积物环境磁学特征及其指示的亚洲季风变化[J]. 第四纪研究,2007,27(6):1053-1062.  
ZHANG W G, DAI X R, ZHANG F R, et al. Magnetic properties of sediments from the Chaohu Lake for the last 7000 years and their implications for the evolution of Asian monsoon[J]. Quaternary Sciences,2007,27(6): 1053-1062.
- [12] 王永红,沈焕庭,张卫国. 长江与黄河河口沉积物磁性特征对比的初步研究[J]. 沉积学报,2004,22(4):658-663.  
WANG Y H, SHEN H T, ZHANG W G. A preliminary comparison of magnetic properties of sediments from the Changjiang and the Huanghe Estuaries[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2004,22(4): 658-663.
- [13] 韦桃源,陈中原,魏子新,等. 长江河口区第四纪沉积物中的地球化学元素分布特征及其古环境意义[J]. 第四纪研究,2006,26(3):397-405.  
WEI T Y, CHEN Z Y, WEI Z X, et al. The distribution of geochemical trace elements in the Quaternary sediments of the Changjiang River mout and the paleoenvironmental implications[J]. Quaternary Science, 2006,26(3):397-405.
- [14] OLDFIELD F, YU L. The influence of particle size variations on the magnetic properties of sediments from the north-eastern Irish Sea[J]. Sedimentology, 1994,41:1093-1108.
- [15] OLDFIELD F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments[J]. J Geophys Res, 1994, 99: 9045-905.
- [16] BLOMENDAL J, LIU X M. Rock magnetism and geochemistry of two Plio-Pleistocene Chinese loess-palaeosol sequence-Implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005,226(1-2):149-166.
- [17] 张卫国,俞立中. 长江口潮滩沉积物的磁学性质及其与粒度的关系[J]. 中国科学(D辑),2002,32(9):783-792.  
ZHANG W G, YU L Z. Magnetic properties of tidel flat sediments of the Yangtze Estuary, and its relationship with particle size[J]. Science in China (D), 2002,32(9):783-792.
- [18] MAHER B A. Magnetic properties of some synthetic submicron magnetites[J]. Geophys J, 1988,94:83-96.
- [19] DAY R, FULLER M, SCHMIDT V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence[J]. Phys Earth Planet Inter, 1977, 13: 260-267.
- [20] TAUXE L, MULLENDER T A J, PICK T. Potbellies, wasp-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis[J]. J Geophys Res. 1996,101(B1): 571-584.
- [21] 张玉芬,李长安,王秋良,等. 江汉平原沉积物磁学特征及对长江三峡贯通的指示[J]. 科学通报,2008,53(5):577-582.  
ZHANG Y F, LI C A, WANG Q L, et al. Magnetism parameters charateristics of drilling de-posits in Jianghan Plain and indiction for forming of the Yangtze River Three Gorges[J]. Chinese Science Bulletin, 2008,53(4): 584-590.