

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020062302

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

张敏¹, 时连强¹, 郭俊丽², 徐岱璐^{1,3}

1. 自然资源部第二海洋研究所国家海岛开发与管理研究中心, 杭州 310012
2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241
3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

摘要: 利用 2010 年 1 月与 2010 年 8 月采集的钱塘江中下游河床沉积物粒度和磁性测量数据以及 2010 年 8 月测量的流速数据, 分析了沉积物粒度和磁性的时空分布特征, 探讨了粒度和磁性参数对沉积动力环境的指示意义。结果表明: (1) 冬季河床沉积物以粉砂和黏土为主, 夏季以粉砂和砂为主, 沉积物粒度呈现从中游到富春江水库逐渐变细、近口段到河口段逐渐变粗的规律, 并且冬季粒度总体上细于夏季, 指示夏季以及河口段较强的水动力环境。(2) 磁性矿物含量从中游到下游呈现逐渐减少的趋势, 夏季磁性矿物含量比冬季高。磁性矿物中亚铁磁性矿物占主导地位, 夏季亚铁磁性矿物的含量高于冬季。(3) $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 和 χ_{ARM}/χ 可以作为这个区域冬季 $< 16 \mu m$ 的细颗粒沉积物的代用指标, $\chi_{fd\%}$ 和 χ_{ARM}/χ 可以作为夏季 $< 32 \mu m$ 细颗粒沉积物的代用指标。(4) 沉积物磁性参数 $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 同样呈现出从中游到富春江水库逐渐变大、而从近口段到河口段逐渐变小的趋势, 这与沉积物磁性矿物晶粒对沉积动力环境的响应是密切相关的, 其中参数 $\chi_{fd\%}$ 与 χ_{ARM} 更能有效地反映沉积动力环境。

关键词: 环境磁学; 源汇过程; 沉积动力环境; 钱塘江中下游

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

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

ZHANG Min¹, SHI Lianqiang¹, GUO Junli², XU Dailu^{1,3}

1. State research center for island exploitation and management, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China
2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China
3. School of Geography and Ocean Sciences, Nan Jing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Based on the particle size and magnetic characteristics of the sediments collected in the middle and lower reaches of the Qiantang River in January 2010 and August 2010, as well as the flow velocity data measured in August 2010, the temporal and spatial distribution of particle size and magnetism of the sediments are analyzed, and their indication significance to the sedimentary dynamic environment discussed. Results show that the river bottom sediments are mainly composed of silt and clay in winter, but dominated by silt and sand in summer. The grain size of the sediments gradually gets fining from middle reaches to the Fuchunjiang Reservoir and becomes coarse from near-mouth section to estuary; the particle size is smaller in winter in general, indicating a stronger hydrodynamic environment in the estuary in summer. The content of magnetic minerals gradually decreases from the middle reaches to the lower reaches. The content of magnetic minerals in summer is higher than that in winter. Ferrimagnetic minerals dominate magnetic minerals, and there are more ferrimagnetic minerals in summer. $\chi_{fd\%}$, χ_{ARM} , $\chi_{ARM}/SIRM$ and χ_{ARM}/χ can be used as proxies for the sediments finer than $16 \mu m$ in the study area in winter, while $\chi_{fd\%}$ and χ_{ARM}/χ be used as indicators for sediments finer than $32 \mu m$ in summer. $\chi_{fd\%}$, χ_{ARM} , χ_{ARM}/χ and $\chi_{ARM}/SIRM$ also show an increasing trend from middle reaches to the Fuchunjiang Reservoir, while show a decreasing trend from near-mouth section to estuary. This is closely related to the response of the sediment magnetic crystals to the sedimentary dynamic environment. $\chi_{fd\%}$ and χ_{ARM} can reflect the sedimentary dynamic environment more effectively.

Key words: environmental magnetism; source to sink; sedimentary dynamic environment; middle and lower reaches of the Qiantang River

资助项目: 国家自然科学基金“河口湾潮滩沉积物来源的环境磁学诊断——以杭州湾庵东浅滩为例”(40806038)

作者简介: 张敏(1995—), 女, 硕士研究生, 从事河口海岸动力地貌学研究, E-mail: cheungmin@sio.org.cn

通讯作者: 时连强(1977—), 男, 教授级高工, 从事河口海岸动力地貌学研究, E-mail: lqshi@sio.org.cn

收稿日期: 2020-06-23; 改回日期: 2020-10-25. 文凤英编辑

沉积物是河口海岸发育的物质基础,其组成蕴含着源区岩性、物质自源到汇搬运过程中的动力、途径及其期间气候调控等综合信息,因此,沉积物组成分析在河口海岸动力地貌学研究中备受关注^[1-6]。包括 IGBP(国际地圈生物圈计划)核心计划海岸带陆海相互作用在内的国际研究计划将物质“源-汇系统研究”作为其关键科学问题和主要研究领域之一。沉积物磁性矿物蕴含着物源、沉积物搬运和分选、沉积环境理化特征等信息,同时磁性测量具有简便、快速、经济、无损等重要特征,已成为地球科学、环境科学研究中的重要手段之一^[7-13]。钱塘江沉积物是杭州湾沉积物的重要来源之一,具有山溪性特点,同时又遭受极端天气和季风的影响^[14],因此,研究钱塘江不同季节动力环境下沉积物的磁学特性及其指示意义对于丰富山溪性河流的沉积动力学研究方法具有重要的科学意义。国内学者对钱塘江流域的沉积物开展过许多研究^[15-16],但通过环境磁学对钱塘江进行季节和沿程变化分析的研究较少。本文拟利用冬季和夏季在钱塘江河口段到中游段采集的河床沉积物,通过粒度与磁性测量数据,结合实测流速信息,分析其粒度特征及磁性

特征的沿程变化与季节性变化规律,探讨沉积物与沉积动力环境之间的关系。

1 研究区概况

钱塘江全长 605 km,发源于安徽省休宁县六股尖,于浙江省北部海盐市澉浦长山东南嘴至余姚市西三闸一线注入杭州湾,其中 310 km 在浙江省境内,流域面积达 $4.99 \times 10^4 \text{ km}^2$,是浙江省第一大河(图 1)。

钱塘江流域在浙江省西部有南、北两源,均发源于安徽省休宁县,南源衢江与金华江汇入兰江,至建德梅城与北源新安江汇合后称富春江,向东北流经东江嘴揽入浦阳江后称钱塘江,向东汇入东海。自潮区界芦茨埠(富春江电站)至闻家堰为近口段,长约 75 km,该河段以径流作用为主,基本上不受海洋来沙影响,河床基本稳定;闻家堰至澉浦,长约 90 km,称为河口段,此段径流与潮流相互作用,河床变化剧烈^[17]。根据潮区界芦茨埠站资料统计,多年平均年径流量为 $2.91 \times 10^{10} \text{ m}^3$,多年平均年输沙量为 $5 \times 10^6 \text{ t}$,径流输沙量集中在 3—6 月,占年输沙量的 60%~85%。

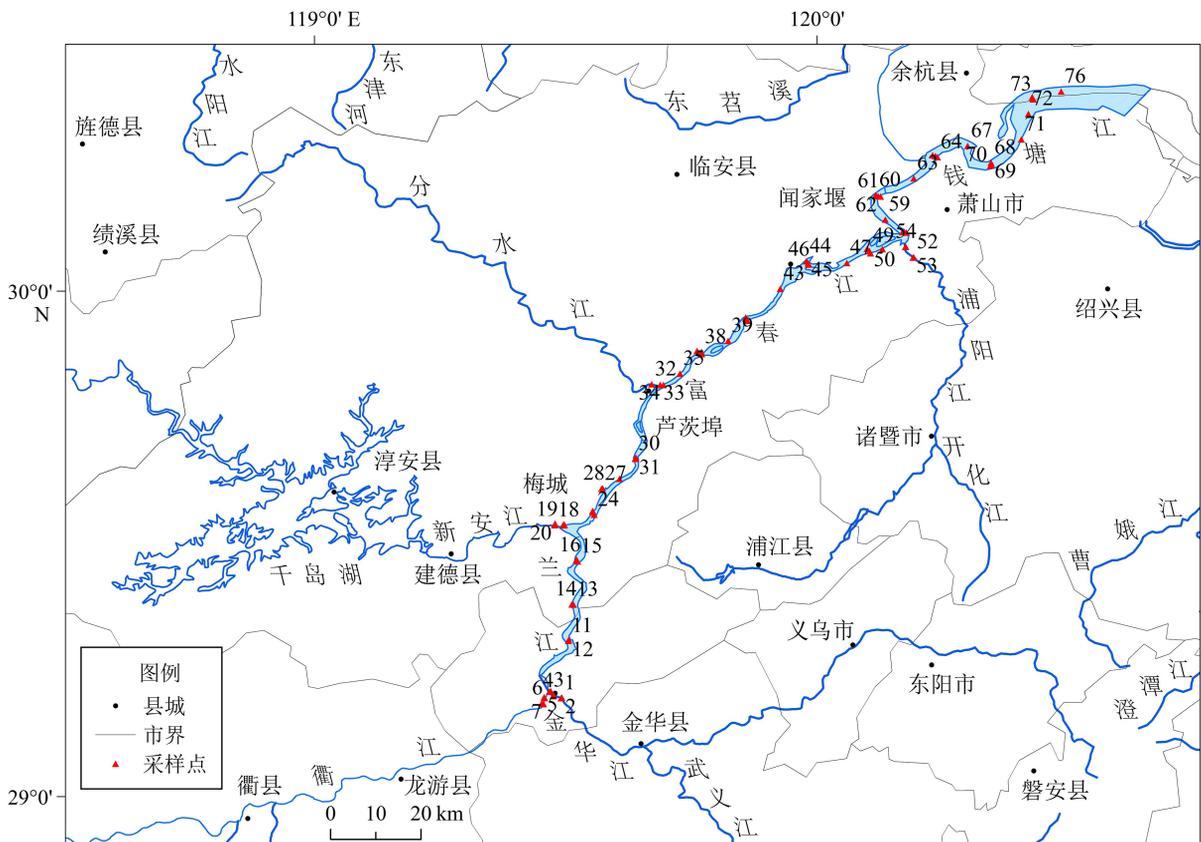


图 1 研究区域与采样站分布图

Fig.1 Study area and location map of sampling stations

钱塘江流域处于亚热带季风湿润气候区,四季分明,气候温和,降水充足,光照丰富,年平均气温为 17 ℃。降水量和径流量均存在年内和年际的波动,年平均降水量为 1100~2400 mm,其中大约 50% 的降水发生在 4—6 月,而 20% 发生在 7 月和 9 月^[15]。

2 样品与方法

钱塘江沿程河床沉积物分别采自 2010 年 1 月与 2010 年 8 月。沿程每隔 10 km 左右布设一条与岸线垂直的采样断面,在每个断面采集 3 个河床沉积物样,采样点分别位于靠近两岸处与中泓处,并在不同断面之间河道中泓采集 1 个河床沉积物样,一共采集了 77 个冬季河床沉积物样品和 62 个夏季河床沉积物样品(图 1)。采样使用不锈钢锚式采样器,用塑料小铲取其中央的表层沉积物分别置入可密封的聚乙烯塑料袋中,带回实验室备测。同时使用 SonTek M9 ADCP 声学多普勒流速剖面仪在每个断面进行流速测量。

粒度分析:将每个沉积物充分混合后,称取 0.06~0.10 g 采用激光粒度仪进行测量,重复相对误差 < 3%,得到沉积物粒径 < 0.5、0.5~1、1~2、2~4、4~8、8~16、16~32、32~63、63~125、125~250、250~500、500~1000、> 1000 μm 的各组分占比。对原始粒度数据进行分析,统计出黏土 (< 4 μm)、粉砂(4~63 μm)和砂(> 63 μm)不同粒级的百分含量,并根据福克-沃德公式^[18]计算海滩沉积物的中值粒径(Mz)。

磁性分析:首先将样品在 35 ℃ 温度下烘干,烘干后研磨,取 7.8~8.0 g 样品装入圆柱状聚乙烯样品盒中进行测量。采用 BartingtonMS2 磁化率仪测量低频磁化率(0.47 kHz)和高频磁化率(4.7 kHz),使用英国 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无磁滞剩磁 ARM,随后用 Molspin 脉冲磁化仪和 Minispin 旋转磁力仪测量在 1T 磁场下获得的饱和等温剩磁 SIRM=IRM_{1T}/m×10,再在其反方向依次加-100 mT 和-300 mT 磁场获得相应等温剩磁。根据测量结果,分别计算质量磁化率 χ 、频率磁化率 $\chi_{fd}\%=(\chi_{lf}-\chi_{hf})/\chi_{lf}\times 100\%$ 、硬剩磁 HIRM=(SIRM+IRM_{-300mT})/2、非磁滞剩磁磁化率 $\chi_{ARM}=ARM/0.3184$ 和比值参数 $S_{-100}=100\times(SIRM-IRM_{-100mT})/(2\times SIRM)$ 、 χ_{ARM}/χ 等。

相关性分析:利用统计软件 SPSS20 版中的相关分析模块,对沉积物粒度参数和磁性参数进行相关性分析,得到两者之间的 Pearson 相关系数,其绝对值的大小表示相关程度,相关系数越大,则相关性越强,正值代表正相关,负值代表负相关。

3 结果分析

3.1 沉积物粒度特征

从表 1 可以看出,钱塘江中下游流域冬夏两季的沉积物粒度组分中,粉砂含量最高,其中河口段和近口段冬季含量比夏季多,中游段冬季含量比夏季少。砂和黏土不同河段不同季节的含量不同,河口段冬夏两季砂的含量远高于黏土的含量;近口段冬季砂的含量比黏土少,夏季砂的含量比黏土多;中游段冬夏两季砂的含量都比黏土少。在砂组分中,河口段和近口段冬季含量比夏季少,中游段冬季含量比夏季多;而在黏土组分中,钱塘江中下游流域冬季含量都比夏季高。从图 2 中值粒径(Mz)的沿程变化图可以进一步发现,冬夏两季沉积物粒度从中游到富春江水库逐渐变细,而近口段到河口段沉积物粒度逐渐变粗,并且冬季粒度总体上细于夏季。

表 1 钱塘江中下游流域河床沉积物粒度参数统计

Table 1 Statistics of grain size parameters of bed sediments in the middle and lower reaches of the Qiantang River

位置	季节	砂/%	粉砂/%	黏土/%	中值粒径/Φ
河口段	冬季	26.23	65.45	6.99	4.53
	夏季	38.23	55.25	5.52	4.33
近口段	冬季	9.33	61.33	25.07	6.35
	夏季	25.74	58.22	13.58	4.95
中游段	冬季	12.31	56.00	27.58	6.70
	夏季	10.47	60.44	25.11	6.59

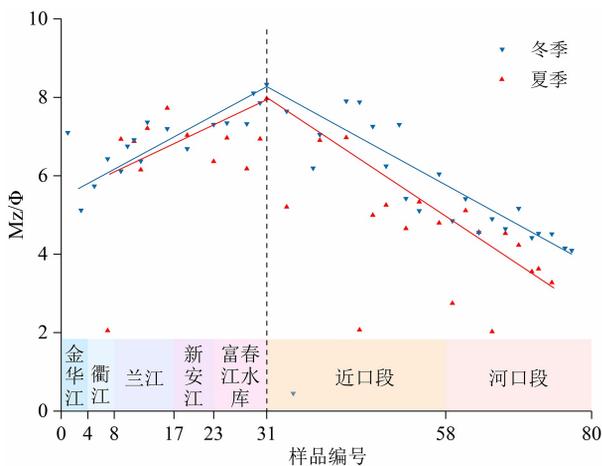


图2 钱塘江中下游流域河床沉积物中值粒径沿程变化
Fig.2 Changes of median grain size of bed sediments along the middle and lower reaches of the Qiantang River

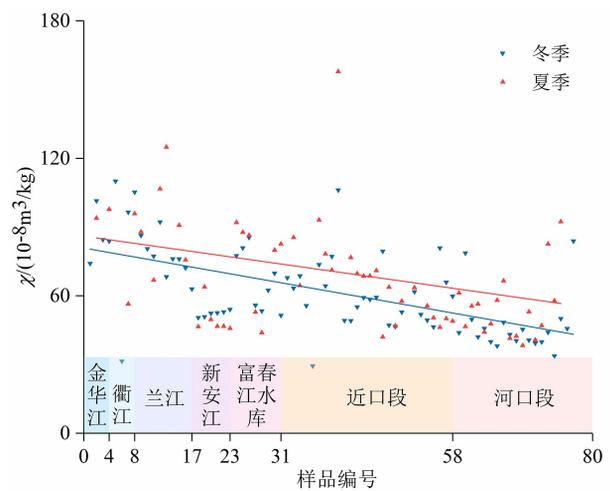


图3 钱塘江中下游流域河床沉积物质量磁化率 (χ) 沿程变化
Fig.3 Changes of mass magnetic susceptibility (χ) of bed sediments along the middle and lower reaches of the Qiantang River

3.2 沉积物磁性特征

3.2.1 磁性矿物含量

质量磁化率 (χ) 可以反映亚铁磁性矿物的含量, 同时其值也受到磁性矿物的类型和晶粒的影响, 常常被用来粗略地估计磁性矿物含量。饱和等温剩磁 (SIRM) 是沉积物样品中磁性矿物富集程度的代表参数, 硬剩磁 (HIRM) 反映不完整反铁磁性矿物的富集程度, 其主要的影响因素为磁性矿物的含量和类型, 晶粒大小对其也有一定影响^[15,19]。

冬季钱塘江河床沉积物 χ 的变化范围为 $29.40 \times 10^{-8} \sim 110.03 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, SIRM 的变化范围为 $4057.22 \times 10^{-6} \sim 29755.00 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$, HIRM 的变化范围为 $117.82 \times 10^{-6} \sim 796.77 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$; 夏季钱塘江河床沉积物 χ 的变化范围为 $38.25 \times 10^{-8} \sim 244.35 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, SIRM 的变化范围为 $3272.30 \times 10^{-6} \sim 34948.41 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$, HIRM 的变化范围为 $7.09 \times 10^{-6} \sim 949.99 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。从图3、图4和图5可以看出, χ 、SIRM 与 HIRM 都呈现出从中游到河口段逐渐减少的趋势, 指示磁性矿物从中游到河口段逐渐减少, 冬夏两季磁性矿物含量相差较小, 但夏季含有较多的亚铁磁性矿物, 冬季含有较多的不完整反铁磁性矿物。其中, SIRM 在样品 18—23 号之间相较于平均值含量较低, 呈现一个普降的变化趋势, 在 54—56 号之间呈现一个陡降的变化趋势。从图1可以看出, 18—23 号位于新安江、兰江和富春江三江汇合处, 很可能是因为兰江和新安江沉积物的混合造成了沉积物磁性矿物含量发生了明显变化; 54—56 号位于浦阳江和钱塘江的汇合处, 其陡降的趋势可能受到浦阳江沉积物的影响, 具体原因需要

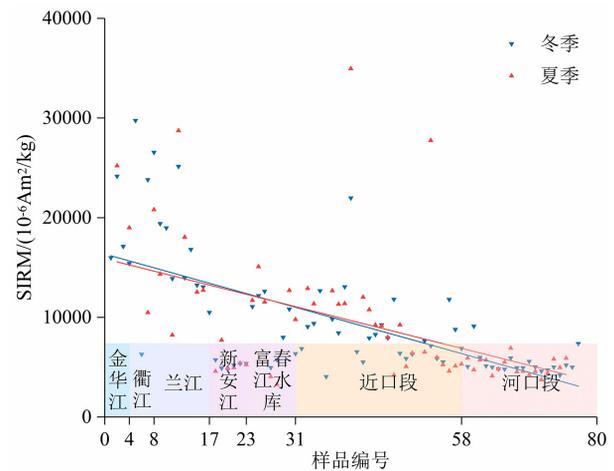


图4 钱塘江中下游流域河床沉积物饱和等温剩磁 (SIRM) 沿程变化

Fig.4 Changes of saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) of bed sediments along the middle and lower reaches of the Qiantang River

做进一步的深入研究予以证实。

3.2.2 磁性矿物类型

SIRM- χ 相关曲线指示磁性矿物的变化, 如果 SIRM- χ 呈线性分布, 则说明沉积物中有一种磁性矿物存在或一种磁性矿物的含量占绝对优势^[20]。

将研究区冬季和夏季河床沉积物样品的质量磁化率 (χ) 和饱和等温剩磁 (SIRM) 做相关性分析 (图6), 发现两个季节河床沉积物 χ 和 SIRM 的相关性系数 R^2 均大于 0.7, 说明两季的沉积物磁性特征均由一种磁性矿物主导。

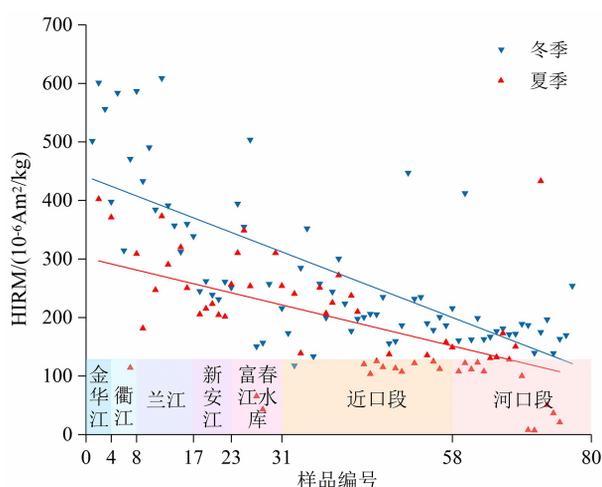


图 5 钱塘江中下游流域河床沉积物饱和剩磁 (HIRM) 沿程变化

Fig.5 Changes of hard remanent magnetization (HIRM) of bed sediments along the middle and lower reaches of the Qiantang River

不完全反铁磁性矿物和亚铁磁性矿物的相对组成可以用退磁参数 S_{-100} 反映, 当 S_{-100} 值大于 70% 时, 即可判定亚铁磁性矿物占主导地位。研究区域冬季和夏季河床沉积物的 S_{-100} 平均值分别为 79.00% 和 82.76%, 说明亚铁磁性矿物主导样品磁性

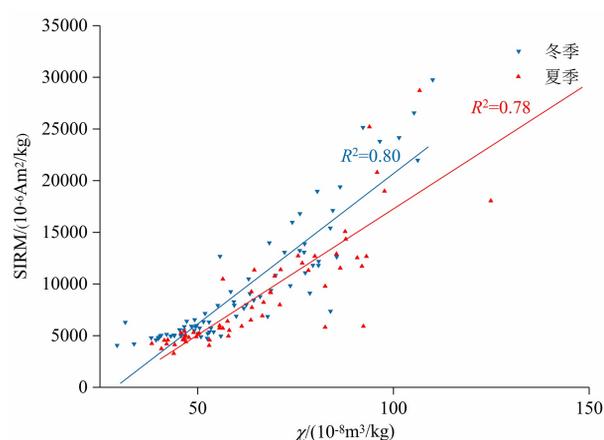


图 6 磁性参数 χ 和 SIRM 之间的相关关系

Fig.6 Correlation between magnetic parameter χ and SIRM

特征, 但不完全反铁磁性矿物也有一定贡献。从图 7 与图 8 可以看出, 冬夏两季的 S_{-100} 总体上均呈现自中游至河口段逐渐递增的变化趋势, 其中兰江以上亚铁磁性矿物冬季含量最少, 夏季逐渐升高; 富春江水库季节性变化不明显, 含量较低; 近口段亚铁磁性矿物冬夏两季均呈递增趋势, 而河口段则呈递减趋势。从总体上看, 夏季亚铁磁性矿物的含量高于冬季, 但冬季的不完全反铁磁性矿物含量比夏季多。

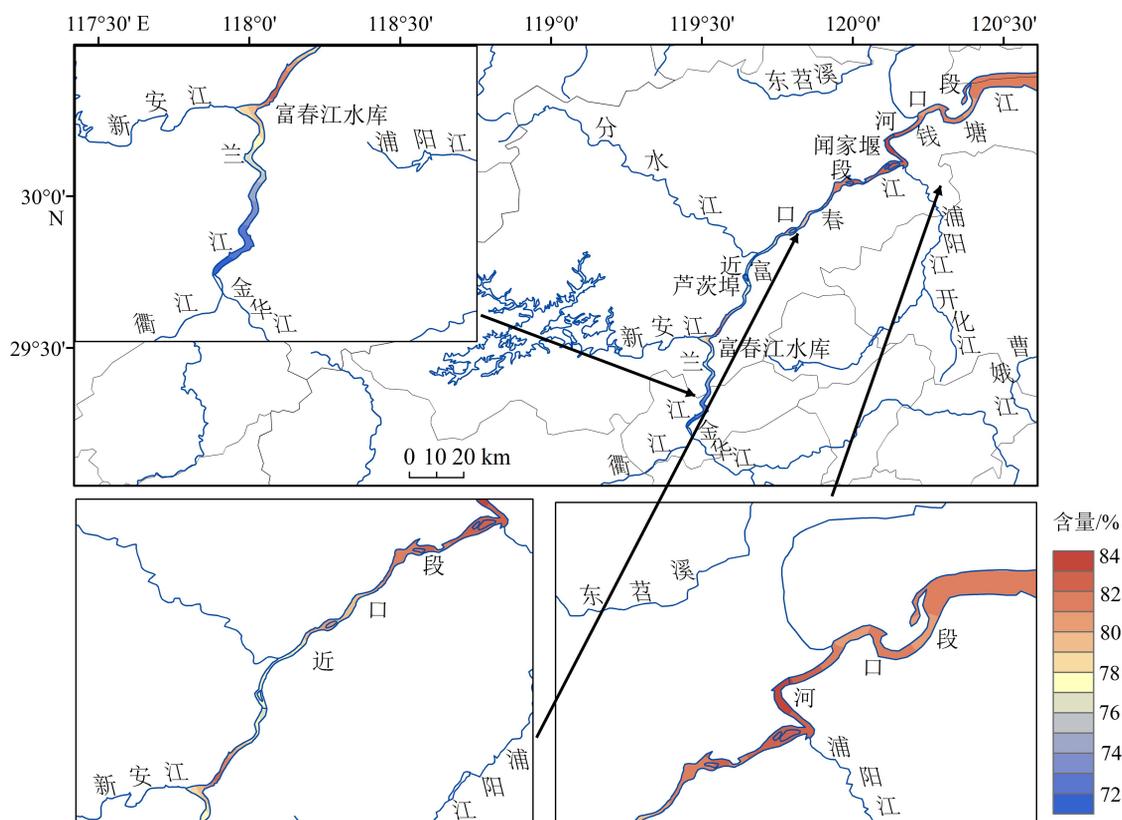


图 7 钱塘江中下游流域冬季河床沉积物 S_{-100} 插图

Fig.7 S_{-100} interpolation map of bed sediments in the middle and lower reaches of the Qiantang River in winter

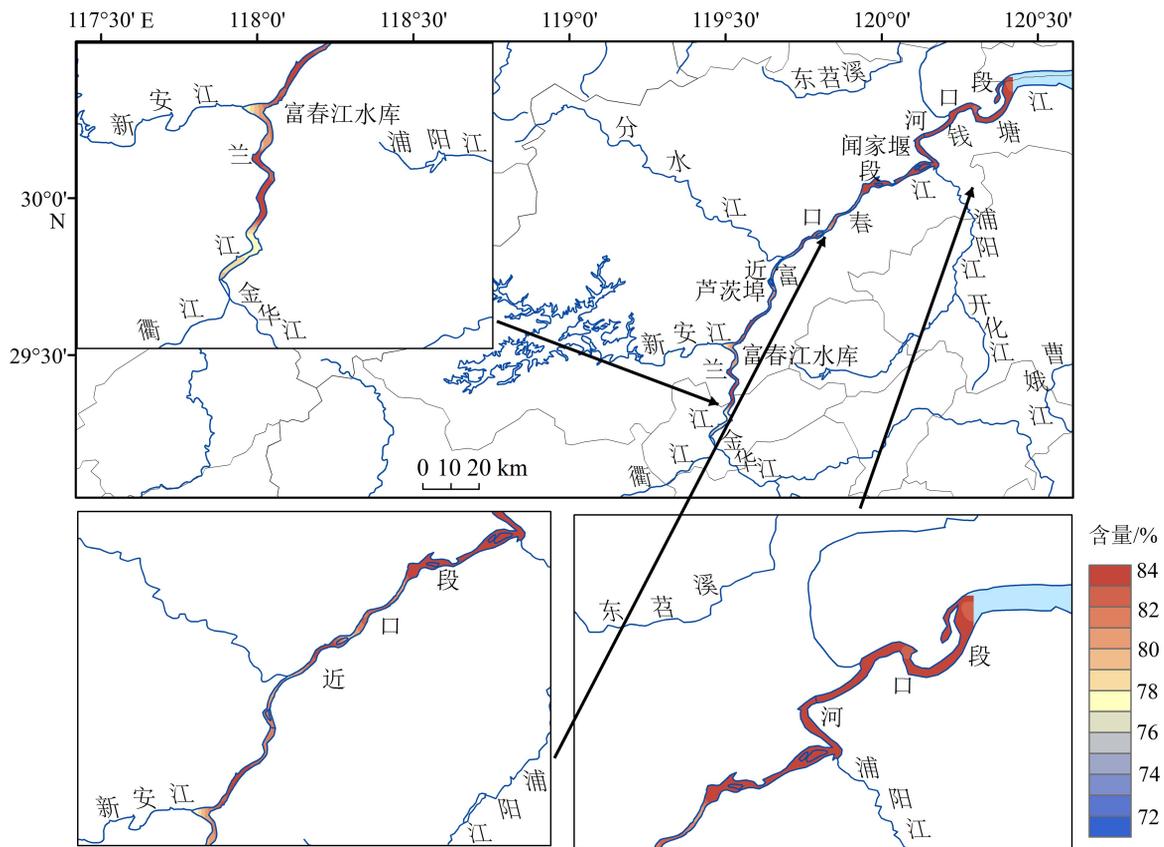


图8 钱塘江中下游流域夏季河床沉积物 S_{100} 插值图

Fig.8 S_{100} interpolation map of bed sediments in the middle and lower reaches of the Qiantang River in summer

3.2.3 磁性矿物的晶粒特征

根据磁铁矿的磁畴结构,一般可将磁铁矿分为多畴(MD, $> 10 \mu\text{m}$)、假单畴(PSD, $0.70 \sim 10 \mu\text{m}$)、单畴(SD, $0.03 \sim 0.70 \mu\text{m}$)和超顺磁(SP, $< 0.03 \mu\text{m}$)。沉积物中SP成分的存在和相对含量可由频率磁化率($\chi_{fd}\%$)的数值来表征:当 $\chi_{fd}\% < 2\%$ 时,可以认为样品中基本不含SP;当 $\chi_{fd}\%$ 为 $2\% \sim 10\%$,表示MD、SD和SP晶粒同时存在; $\chi_{fd}\%$ 为 $10\% \sim 14\%$ 时,则表明基本上全部为SP晶粒,其含量在75%以上^[21]。

钱塘江中下游流域冬季河床沉积物中 $\chi_{fd}\%$ 为 $1.05\% \sim 13.25\%$,平均值为 5.62% ,其中78.38%的样品 $\chi_{fd}\%$ 值介于 2% 与 10% 之间,10.81%的样品 $\chi_{fd}\%$ 值介于 10% 与 14% 之间,表明冬季SP晶粒含量较多。夏季河床沉积物 $\chi_{fd}\%$ 主要集中在 $< 10\%$ 的范围内,17.74%的样品 $\chi_{fd}\% < 2\%$,80.65%的样品 $\chi_{fd}\%$ 值介于 2% 与 10% 之间,表明夏季SP晶粒含量较冬季少。

χ_{ARM} 受磁性矿物晶粒大小影响显著,对粗粒稳定单畴(SSD)较为敏感。比值参数 χ_{ARM}/χ 可指示亚铁磁性矿物晶粒大小,较高比值反映了SSD晶粒,较低比值则显示了较多的MD或SP晶粒。 $\chi_{ARM}/SIRM$ 与 χ_{ARM}/χ 类似,但 $\chi_{ARM}/SIRM$ 不受SP

晶粒的影响,较低比值则反映了较粗的MD晶粒^[22]。钱塘江河床沉积物 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 这3个参数冬季和夏季所分布的趋势大体一致(图9、图10),低值区主要出现在河口段以及兰江以上区域,高值区出现在富春江水库和新安江流域,指示了河口段及兰江以上区域沉积物亚铁磁性矿物晶粒以PSD-MD为主。

从图9和图10还可以发现,冬夏两季 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 值都呈现出从中游段到富春江水库逐渐增大、从近口段到河口段逐渐变小的趋势。

3.3 钱塘江中下游流速特征

由于夏季是钱塘江的洪季,流量最大,更具有代表性,因此对钱塘江2010年夏季的流速数据进行插值分析,从图11中可以看出,河口段的流速最强,流速为 $0.35 \sim 4.00 \text{ m/s}$,平均值为 1.53 m/s ;近口段次之,流速为 $0.03 \sim 0.65 \text{ m/s}$,平均值为 0.44 m/s ;富春江水库以上的流速较弱,流速为 $0.07 \sim 0.43 \text{ m/s}$,平均值为 0.21 m/s 。这表明受潮流和径流的相互作用,河口段有最强的水动力条件,流速强弱分布呈现从河口段到中游段逐渐减弱的趋势。

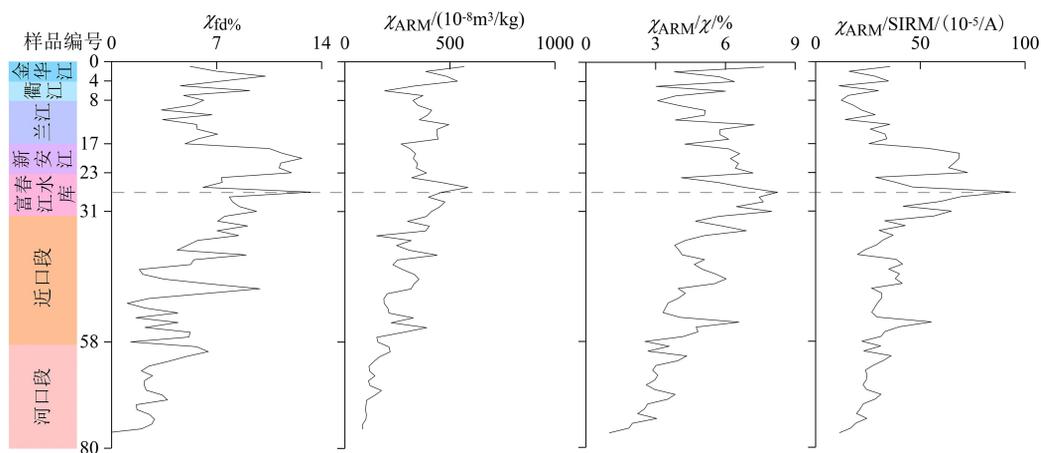


图 9 钱塘江中下游流域冬季 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 参数的沿程变化

Fig.9 Changes of $\chi_{fd}\%$, χ_{ARM} , χ_{ARM}/χ and $\chi_{ARM}/SIRM$ parameters along the middle and lower reaches of the Qiantang River in winter

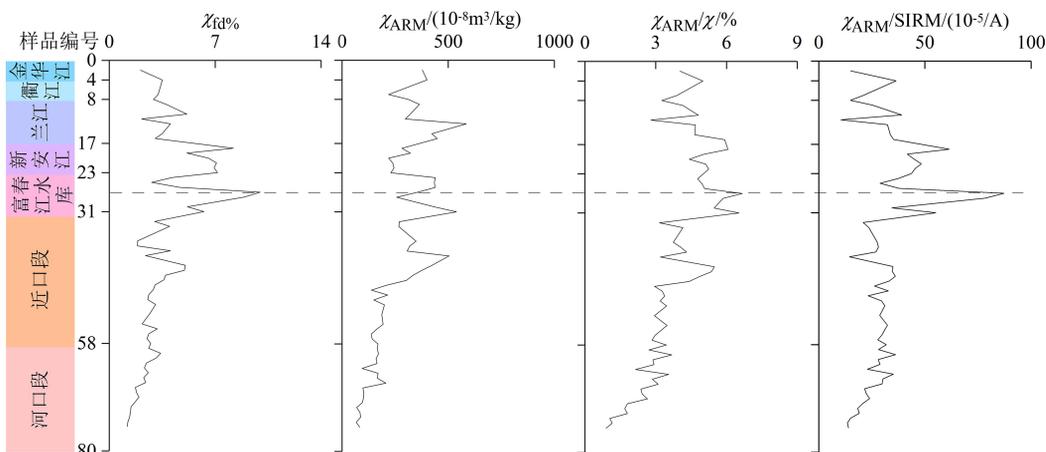


图 10 钱塘江中下游流域夏季 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 参数的沿程变化

Fig.10 Changes of $\chi_{fd}\%$, χ_{ARM} , χ_{ARM}/χ and $\chi_{ARM}/SIRM$ parameters along the middle and lower reaches of the Qiantang River in summer

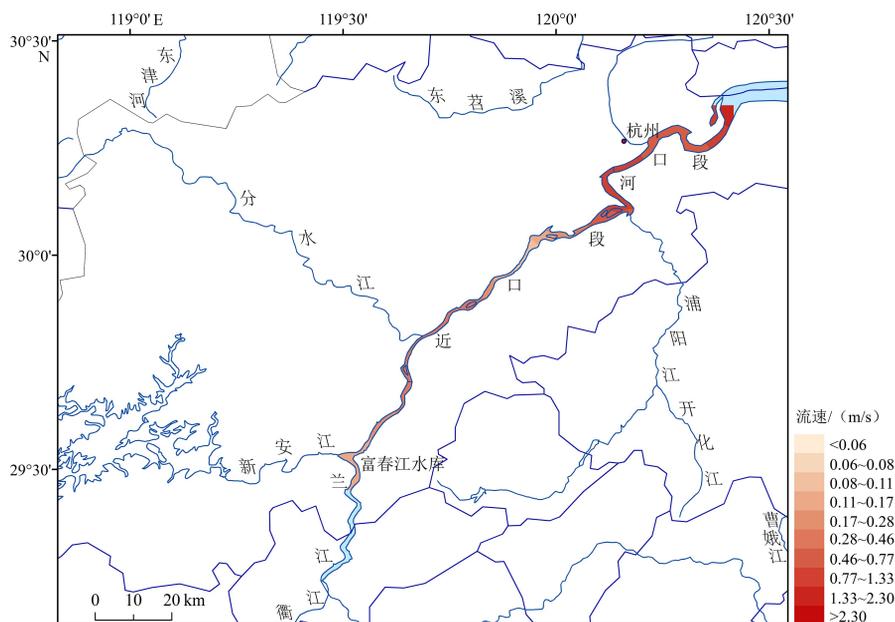


图 11 钱塘江中下游流域夏季流速大小分布图

Fig.11 Flow velocity distribution of the middle and lower reaches of the Qiantang River in summer

4 讨论

4.1 磁性特征与粒度组成的关系

沉积物磁性特征主要受磁性矿物的种类、含量和磁性晶粒大小控制,而这些因子又受沉积物来源、搬运过程的水动力条件以及沉积环境影响^[4]。通过对沉积物粒度及其磁性特征关系进行分析,可以反演磁性特征所反映的动力沉积环境信息。

从表2和表3可以看出,参数 χ 冬夏两季几乎与粒度参数没有相关性。SIRM冬季与各粒级的相关性不显著,但夏季与32~63 μm 粒径呈明显负相关。HIRM冬季与32~63 μm 呈负相关,夏季与<2 μm 、<4 μm 、<8 μm 、<16 μm 、<32 μm 、2~4 μm 、4~8 μm 粒级及黏土、平均粒径和中值粒径呈正相关,其中与<2 μm 的相关性最为显著。冬季 $\chi_{\text{fd}\%}$ 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}/\text{SIRM}}$ 和 χ_{ARM}/χ 与<2 μm 、<4 μm 、<8 μm 、<16 μm 、<32 μm 、<63 μm 、2~4 μm 、4~8 μm 、8~16 μm 粒级及黏土含量、平均粒径和中值粒径呈正相关,其中与<16 μm 的相关性呈逐渐增大的趋

势,而与>16 μm 的相关性则呈逐渐减小的趋势;与16~32 μm 、32~63 μm 、砂含量和粉砂含量呈负相关关系。夏季 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}/\text{SIRM}}$ 与各粒级的相关性规律不明显,不过 $\chi_{\text{ARM}/\text{SIRM}}$ 与8~16 μm 粒级呈显著正相关。夏季 $\chi_{\text{fd}\%}$ 和 χ_{ARM}/χ 与<2 μm 、<4 μm 、<8 μm 、<16 μm 、<32 μm 、<63 μm 、2~4 μm 、4~8 μm 、8~16 μm 粒级以及黏土含量、平均粒径和中值粒径呈正相关,其中与<32 μm 的相关性呈逐渐增大的趋势,与>32 μm 的相关性逐渐减小;与32~63 μm 和砂含量呈负相关关系。

通过以上分析可以看出,沉积物磁学参数 $\chi_{\text{fd}\%}$ 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}/\text{SIRM}}$ 和 χ_{ARM}/χ 可以作为这个区域冬季<16 μm 细颗粒沉积物的代用指标, $\chi_{\text{fd}\%}$ 和 χ_{ARM}/χ 可以作为夏季<32 μm 细颗粒沉积物的代用指标。鉴于细颗粒泥沙在沉积动力、环境污染等研究中的重要性,这种磁学替代指标具有重要的应用价值^[9]。

4.2 沉积物磁性特征对动力沉积环境的响应

沉积物的中值粒径(Φ)呈现出从中游到富春江水库逐渐变大,而从近口段到河口段逐渐变小的趋

表2 钱塘江中下游流域冬季河床沉积物磁性参数与粒度参数的相关性

Table 2 Correlations between magnetic parameters and grain size characteristics of bed sediments in the middle and lower reaches of the Qiantang River in winter

粒级/ μm	χ	SIRM	HIRM	$\chi_{\text{fd}\%}$	χ_{ARM}	$\chi_{\text{ARM}/\text{SIRM}}$	χ_{ARM}/χ
<2	0.211	0.198	0.183	0.494**	0.580**	0.413**	0.556**
<4	0.182	0.180	0.189	0.551**	0.604**	0.471**	0.609**
<8	0.159	0.169	0.209	0.604**	0.632**	0.521**	0.654**
<16	0.164	0.192	0.231*	0.620**	0.653**	0.529**	0.662**
<32	0.179	0.205	0.204	0.570**	0.618**	0.496**	0.605**
<63	0.125	0.082	0.008	0.308**	0.303**	0.325**	0.283*
2~4	0.138	0.143	0.194	0.611**	0.615**	0.535**	0.662**
4~8	0.107	0.141	0.234*	0.671**	0.650**	0.588**	0.706**
8~16	0.170	0.243*	0.269*	0.576**	0.637**	0.483**	0.593**
16~32	0.029	0.018	-0.165	-0.369**	-0.314**	-0.283*	-0.410**
32~63	-0.164	-0.261*	-0.345**	-0.623**	-0.712**	-0.470**	-0.714**
砂	-0.125	-0.082	-0.008	-0.308**	-0.303**	-0.325**	-0.283**
粉砂	0.030	-0.084	-0.192	-0.189	-0.247**	-0.073**	-0.279**
黏土	0.180	0.182	0.199	0.564**	0.611**	0.475**	0.617**
平均粒径	0.129	0.131	0.124	0.447**	0.482**	0.443**	0.487**
中值粒径	0.143	0.143	0.141	0.489**	0.478**	0.418**	0.454**

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

表 3 钱塘江中下游流域夏季河床沉积物磁性参数与粒度参数的相关性

Table 3 Correlations between magnetic parameters and grain size characteristics of bed sediments in the middle and lower reaches of the Qiantang River in summer

粒度/ μm	χ	SIRM	HIRM	$\chi_{\text{fd}}\%$	χ_{ARM}	$\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$	χ_{ARM}/χ
<2	0.222	0.318*	0.420**	0.386**	0.190	0.252*	0.406**
<4	0.219	0.302*	0.409**	0.410**	0.190	0.267*	0.417**
<8	0.214	0.280*	0.396**	0.429**	0.183	0.280*	0.422**
<16	0.182	0.252*	0.384**	0.491**	0.179	0.313*	0.436**
<32	0.120	0.194	0.362**	0.517**	0.168	0.337**	0.428**
<63	-0.028	-0.009	0.230	0.393**	0.105	0.289*	0.290**
2~4	0.214	0.281*	0.393**	0.436**	0.189	0.282*	0.426**
4~8	0.193	0.230	0.349**	0.428**	0.160	0.281*	0.400**
8~16	0.074	0.143	0.021	0.560**	0.141	0.340**	0.398**
16~32	-0.216	-0.178	0.023	0.269*	0.005	0.206	0.102
32~63	-0.289*	-0.404**	-0.317*	-0.342**	-0.151	-0.165	-0.346**
砂	0.025	0.004	-0.232	-0.397**	-0.106	-0.290*	-0.293*
粉砂	-0.184	-0.213	0.047	0.271*	0.019	0.222	0.124
黏土	0.221	0.302*	0.408**	0.411**	0.191	0.267*	0.418**
平均粒径	0.111	0.153	0.349**	0.436**	0.158	0.297*	0.371**
中值粒径	0.109	0.151	0.340**	0.414**	0.141	0.279*	0.354**

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

势,这与钱塘江沿程流速分布特征大致是相对应的(图 2、图 11)。钱塘江流域来水丰沛,有丰富的水能资源,多年平均年径流总量为 $2.91 \times 10^{10} \text{ m}^3$,中游径流作用强,但由于水库的修建,径流流速减缓,即使是在夏季,富春江水库段水流流速也仅有 0.20 m/s ,细颗粒沉积于水库中^[15],因此,沉积物粒径从中游到富春江水库变细。杭州湾是一典型的喇叭型河口湾,水面宽由湾口的 100 km 至澉浦骤减至 20 km ,同时澉浦以西沙坎急速升高,水深变浅。当较大潮差的潮波进入河口后,受束窄影响,潮波急剧变形,至尖山形成涌潮,一般上溯至杭州闸口以上,河口段潮流和径流相互作用,总体上水动力比近口段强,流速较大(图 11),因此河口段沉积物颗粒比近口段的粗^[23-24]。

从图 2 可以看出,钱塘江中下游沉积物粒度呈现出夏粗冬细的变化特征,这与夏季有洪水影响、水动力比冬季强相对应。利用 Morten Pejrup 提出的三角图分类方法^[25],从沉积物结构组成及其反映的水动力强度来看,两个季节的钱塘江中下游流域沉积物主要分布在 III、IV 区(图 12),说明了钱塘江中下游流域河流的水动力相对较强。从不同区域

来看,冬夏季河口段沉积物主要集中分布在 IV 区,说明河口段水动力比近口段和中游段都强。其中,夏季河口段主要分布于 B-IV 和 C-IV,少量分布于 D-III 和 D-IV;而冬季则主要分布于 C-IV,少量分布于 B-IV 和 D-IV,总体上砂组分含量夏季较冬季高,表明夏季水动力比冬季强。近口段沉积物冬季多集中于 D-III,夏季则分散于 C-IV、D-III 和 D-IV,粉砂含量较多,季节变化比较明显。

与沉积物中值粒径分布特征一样,沉积物磁性参数 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 同样呈现出从中游到富春江水库逐渐变大、而从近口段到河口段逐渐变小的趋势(图 9、图 10),显然,这与沉积物磁性矿物晶粒对沉积动力环境的响应是密切相关的。在自然状况下,磁性矿物晶粒会遵循水力学原理,按其粒径大小分异和沉积,因此指示磁性矿物晶粒大小的参数 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 在判别水动力能量上具有一定的价值^[26]。 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 较大时表明沉积物的颗粒比较细,指示较弱的沉积动力环境, $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 较小时则相反,指示较粗的沉积物和较强的沉积动力环境。但是,从表 2 和表

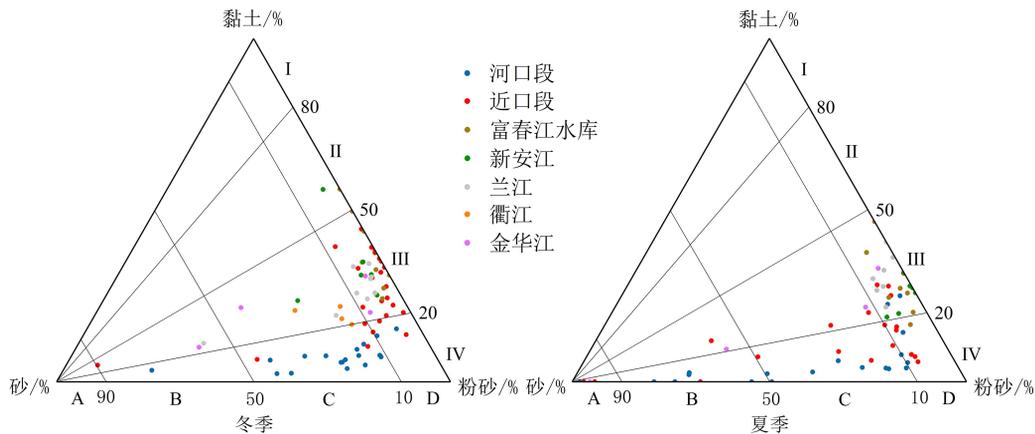


图 12 钱塘江中下游冬夏季河床沉积物各组分含量分布图

Fig.12 Content distribution of each component of bed sediments in the middle and lower reaches of the Qiantang River in winter and summer

3 可看出, 参数 χ 、SIRM 与粒度的相关性都比较低, 因此, $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM} 更能有效地反映沉积动力环境。

5 结论

(1) 钱塘江冬夏两季由于水动力条件的不同, 河床沉积物类型占比也会产生差异, 冬季河床沉积物以粉砂和黏土为主, 夏季以粉砂和砂为主, 沉积物粒度从中游到富春江水库逐渐变细, 而近口段到河口段沉积物粒度逐渐变粗, 并且冬季粒度总体上细于夏季。

(2) 对于磁性矿物含量, 钱塘江中下游磁性矿物从中游到下游呈现逐渐减少的趋势, 夏季磁性矿物含量比冬季高。对于磁性矿物类型, 两季的亚铁磁性矿物占主导地位, 夏季亚铁磁性矿物的含量高于冬季, 但冬季的不完全反铁磁性矿物比夏季多。

(3) $\chi_{fd\%}$ 等磁性矿物参数与细粒级组分高度正相关。 $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 和 χ_{ARM}/χ 可以作为这个区域冬季 $<16\ \mu\text{m}$ 的细颗粒沉积物的代用指标, $\chi_{fd\%}$ 和 χ_{ARM}/χ 可以作为夏季 $<32\ \mu\text{m}$ 的代用指标。

(4) 沉积物磁性参数 $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 同样呈现出从中游到富春江水库逐渐变大、而从近口段到河口段逐渐变小的趋势, 这与沉积物磁性矿物晶粒对沉积动力环境的响应是密切相关的, 其中参数 $\chi_{fd\%}$ 与 χ_{ARM} 更能有效地反映沉积动力环境。

致谢: 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室张卫国教授给予笔者磁学测试和计算方法的指导, 在此表示真挚的感谢, 同时感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] Krom M D, Stanley J D, Cliff R A, et al. Nile River sediment fluctuations over the past 7000 yr and their key role in sapropel development [J]. *Geology*, 2002, 30(1): 71-74.
- [2] Revel M, Ducassou E, Grousset F E, et al. 100, 000 years of African monsoon variability recorded in sediments of the Nile margin [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(11-12): 1342-1362.
- [3] Montero-Serrano J C, Bout-Roumazeilles V, Sionneau T, et al. Changes in precipitation regimes over North America during the Holocene as recorded by mineralogy and geochemistry of Gulf of Mexico sediments [J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 74(3-4): 132-143.
- [4] Yang S L, Xu K H, Milliman J D, et al. Decline of Yangtze River water and sediment discharge: Impact from natural and anthropogenic changes [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 12581.
- [5] 杨云平, 张明进, 李松喆, 等. 三峡大坝下游粗细颗粒泥沙输移规律及成因[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(4): 942-954. [YANG Yunping, ZHANG Mingjin, LI Songzhe, et al. Transport patterns of the coarse and fine sediments and its causes in the downstream of the Three Gorges Dam [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(4): 942-954.]
- [6] 肖晓. 南海北部湾底质沉积物粒度和泥沙运移趋势研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2015. [XIAO Xiao. Surface sediment grain size and transport of the Beibu gulf in South China Sea[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2015.]
- [7] Maher B A. Environmental magnetism and climate change [J]. *Contemporary Physics*, 2007, 48(5): 247-274.
- [8] Liu Q S, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: Principles and applications [J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): RG4002.
- [9] 时连强, 李九发, 张卫国, 等. 黄河三角洲飞雁滩HF孔沉积物的磁性特征及其环境意义[J]. *海洋学研究*, 2007, 25(4): 13-23. [SHI Lianqiang, LI Jiufa, ZHANG Weiguang, et al. Magnetic properties of Core HF from Feiyantan tidal flat, the Huanghe River Delta and its

- environmental significance [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2007, 25(4): 13-23.]
- [10] 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[J]. *地理科学*, 2014, 34(10): 1262-1269. [PENG Jun, CHEN Hongquan, MA Suisui, et al. Magnetic properties of sediment and sedimentary environment in tidal flat of the Yellow River Delta [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(10): 1262-1269.]
- [11] 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指示意义[J]. *海洋学报*, 2015, 37(5): 101-111. [PAN Dadong, WANG Zhanghua, CHEN Ting, et al. Mineral magnetic characteristics of surficial sediments and their implications for identifying sedimentary environments at the Changjiang River mouth [J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(5): 101-111.]
- [12] 李金婵, 陈秀玲, 方红, 等. 福州河道表层沉积物磁学特征及其环境意义[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(1): 17-25. [LI Jinchan, CHEN Xiuling, FANG Hong, et al. Magnetic properties of river sediments in Fuzhou and their environmental significance [J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(1): 17-25.]
- [13] 杨小强, Grapes R, 周厚云, 等. 珠江三角洲沉积物的岩石磁学性质及其环境意义[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 51(1): 56-66. [YANG Xiaoqiang, Grapes R, ZHOU Houyun, et al. Magnetic properties of sediments from the Pearl River Delta, South China: Paleoenvironmental implications [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(1): 56-66.]
- [14] 钱塘江志编纂委员会. 钱塘江志[M]. 北京: 方志出版社, 1998. [Qiantang River Records Compilation Committee. *Qiantang River Journal*[M]. Beijing: Local Records Press, 1998.]
- [15] 刘朝. 钱塘江流域河流表层沉积物特征及物源分析[D]. 华东师范大学硕士学位论文, 2016. [LIU Chao. Study on the characteristics of surface sediment in the Qiantang River and analysis of provenance[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2016.]
- [16] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第十四分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998. [China Gulf Records Compilation Committee. *Chinese Gulf Journal (Part 14)*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1998.]
- [17] Folk R L, Ward W C. Brazos River Bar: a study on the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [18] 赖智荣. 钱塘江河流表层沉积物矿物特征及其物源指示意义[D]. 华东师范大学硕士学位论文, 2019. [LAI Zhirong. Study on the characteristics of minerals of surface sediment in the Qiantang River and analysis of provenance[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2019.]
- [19] 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: 地球科学*, 2003, 46(9): 954-966. [ZHANG Weiguo, YU Lizhong. Magnetic properties of tidal flat sediments of the Yangtze Estuary and its relationship with particle size [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(9): 954-966.]
- [20] 褚慧敏, 周立旻, 黄静, 等. 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*, 2016, 36(4): 57-66. [CHU Huimin, ZHOU Limin, HUANG Jing, et al. Rock-magnetic properties of the point bar deposits in the upper mainstream of Minjiang River and their origin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 57-66.]
- [21] 董瑞斌, 张卫国, 卢升高, 等. 土壤和沉积物的磁参数及其在环境科学中的应用[J]. *科技通报*, 2000, 16(6): 479-483. [DONG Ruibin, ZHANG Weiguo, LU Shenggao, et al. The magnetic indexes for soil and sediment and their applications on environmental studies [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2000, 16(6): 479-483.]
- [22] 陈晖, 刘坤松, 郭晓娟, 等. 珠江磨刀门河口表层沉积物磁性特征及其动力沉积环境意义[J]. *海洋学报*, 2017, 39(3): 44-54. [CHEN Hui, LIU Kunsong, GUO Xiaojuan, et al. Magnetic properties of surficial sediment and its implication for sedimentation dynamic environment in the Modaomen Outlet of the Pearl River Estuary [J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(3): 44-54.]
- [23] 林炳尧, 黄世昌, 毛献忠, 等. 钱塘江河口潮波变化过程[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2002, 17(6): 665-675. [LIN Bingyao, HUANG Shichang, MAO Xianzhong, et al. Deformation process of tidal waves in Qiantang Estuary [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2002, 17(6): 665-675.]
- [24] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第五分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1992. [China Gulf Records Compilation Committee. *Chinese Gulf Journal (Part 5)*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992.]
- [25] Pejrup M. Flocculated suspended sediment in a micro-tidal environment [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 57(3-4): 249-256.
- [26] 周开胜, 孟翊, 刘苍宇, 等. 长江口北支潮流沉积物磁性特征与沉积环境分析[J]. *海洋通报*, 2008, 27(5): 47-55. [ZHOU Kaisheng, MENG Yi, LIU Cangzi, et al. Magnetic properties and sedimentary environment of the Xinglong Sand in the North Branch, the Yangtze Estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 2008, 27(5): 47-55.]