

九龙江口潮滩表层沉积物矿物磁性分异特征及其沉积环境意义

潘大东, 廖紫慧, 梁文清, 刘亚飞, 肖翊琦, 朱春津

(闽南师范大学 历史地理学院, 福建 漳州 363000)

摘要: 为寻找有效判别潮滩沉积微相的磁学指标, 以便将环境磁学更好地应用于河口古环境演变及海平面重建, 本研究在九龙江口浒茂洲东部潮滩4个亚带: 高潮滩、中潮滩、低潮滩和潮下带, 采集23个次表层沉积物样品, 进行粒度和磁性测量。结果显示, 磁性参数 χ 、SIRM由陆向海增大且在低潮滩和潮下带呈现显著高值, 反映潮滩亚铁磁性矿物的绝对含量由陆向海增加; 参数组合 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 在高、中潮滩呈现高值, 低潮滩和潮下带呈现低值, 反映细颗粒SP/SD亚铁磁性矿物富集于高、中潮滩, 而粗颗粒PSD/MD铁磁性矿物富集于低潮滩和潮下带, 揭示九龙江河口潮滩沉积动力对磁性矿物的分选作用。磁性参数组合 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 可作为九龙江口高潮滩和中潮滩的有效识别指标。

关键词: 沉积动力; 磁性矿物; 沉积微相识别; 九龙江河口潮滩

中图分类号: P512.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)11-0030-12

DOI: 10.11759/hyxx20210319004

河口海岸是海陆相互作用的关键地带, 晚第四纪以来全球多数河口沉积了巨厚的沉积物^[1], 这些沉积物记录了重要的古环境信息, 因此河口是研究古环境演变、海平面变化、流域气候变迁、古人类活动等的重要区域^[2-5]。潮滩是河口的重要地貌部位, 因其受沉积动力、海水淹没的强度及时间差异的影响, 形成不同的微地貌^[6]。全新世基底的盐沼-潮滩沉积微相及地层方法是重建全新世高精度海平面曲线的重要手段^[7-8]。然而, 地层中的潮滩微相因具有相似的沉积构造和岩性而难以识别^[9]。因此, 潮滩微相识别的沉积学研究具有重要意义。要识别地层中的潮滩微相, 首先应该寻找现代潮滩微相的代用指标。

环境磁学是地学、磁学和环境科学之间的交叉学科, 已有50余年的发展历史^[10]。沉积物的磁性可以反映磁性矿物的含量、类型和晶粒, 记录了大量的环境信息, 可用来研究环境变化和环境问题^[10], 目前, 环境磁学已成为古环境演变和物源研究的重要指标被广泛应用^[2-4, 11-12]。在河口三角洲地区, 前人将环境磁学方法应用于古气候变化^[13]、海侵事件^[14]、沉积环境演变^[15]、流域人类活动^[5, 16]等领域。然而, 磁性矿物在氧化-还原条件下易发生溶解和生成次生矿物^[17], 因此在解释磁性参数时应注意早期成岩作用的影响^[18-19]。我们的前期工作考察了长江口不同

沉积环境的磁性矿物分异特征, 建立了识别长江河口-陆架沉积环境的磁学指标^[20]。为进一步将环境磁学手段应用于河口沉积环境的微相识别, 本研究通过测量和分析九龙江河口潮滩次表层沉积物的粒度和磁性, 尝试揭示该区磁性矿物的沉积微相分异规律, 寻找有效识别潮滩沉积微相的磁学指标。

1 研究区概况

九龙江是南亚热带山溪性中小河流, 流域面积 $1.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[21], 为福建省第二大河。九龙江流域为南亚热带海洋性湿润季风气候, 年均降水量1400~1800 mm, 夏秋季多台风^[22], 降水集中在4~9月。北溪和西溪年均径流量分别为 $8.27 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $3.70 \times 10^9 \text{ m}^3$, 年均含沙量分别为 0.206 kg/m^3 和 0.210 kg/m^3 ^[23]。九龙江河口受径流、潮流影响, 涨潮流偏北岸, 落潮流和径流偏南岸入海, 此外, 以鸡屿为中心形成逆时针

收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-07-02

基金项目: 福建省中青年骨干教师教育项目(JAT190366); 闽南师范大学博士启动项目(L21710); 福建省大学生创新创业训练计划项目(202010402050) [Foundation: Young and middle-aged teacher education project of Fujian Province, No. B11940; Doctoral research fund of Minnan normal university, No. L21710; Innovation and entrepreneurship project of college students of Fujian Province, No. 202010402050]

作者简介: 潘大东(1983—), 男, 重庆巫溪人, 讲师, 博士, 主要从事河口三角洲沉积地貌与第四纪环境演变研究, 电话: 18859663719, E-mail: dadongdedou@163.com

河口余流^[24]。九龙江河口为非正规半日浅海潮，潮流特征为往复流，平均潮差 3.99 m，最大潮差 6.42 m^[25]。南港为径流入海的主要通道(图 1a)，北港逐渐淤浅，河

口湾水下地形向海倾斜，坡度约为 2%。在三角洲平原与河口湾的交汇地带发育淤泥质潮滩，其中以许茂洲东部潮滩面积最大，经测量约为 5.1 km²(图 1b)。



图 1 研究区域(a)及采样站位分布(b)
Fig. 1 Location of the study area and sampling locations

2 样品与方法

2.1 样品来源和分区

本研究于 2020 年 1 月在九龙江口许茂洲东部潮滩采集 23 个沉积物样品(图 1, 表 1), 采集表层 1 cm 以下, 长、宽各 10 cm 方格内的次表层沉积物, 采样厚度约 1 cm。潮滩的地势由陆向海倾斜, 各地貌部

位受潮流作用的强度和时间存在差异, 因此形成地貌分异^[6]。平均大潮高潮线与最高高潮线间为潮上带^[6], 在研究区已人为围垦。平均大潮低潮线与平均大潮高潮线间为潮间带, 其又分为高、中、低潮滩。高潮滩位于平均小潮高潮线与平均大潮高潮线间, 海水淹没时间最短, 在九龙江口主要生长红树林; 平均小潮低潮线和平均小潮高潮线之间为中潮滩,

主要植被是互花米草；平均大潮低潮线和平均小潮低潮线之间的部位为低潮滩^[6]，无植被生长。潮下带位于最低低潮线与平均大潮低潮线之间，海水淹没

时间最长。因此，本研究根据九龙江河口潮滩微地貌特征，将采样站位划分为四个地貌单元：高潮滩、中潮滩、低潮滩和潮下带。

表 1 九龙江河口潮滩次表层沉积物站位信息

Tab. 1 Site information of subsurficial sediment samples of the tidal flat in the Jiulong Estuary

地貌单元	站位	北纬	东经	岩性
高潮滩	T1	24°26'39.73"	117°54'50.32"	黏土质粉砂
	T2	24°26'39.47"	117°54'54.41"	粉砂质黏土
	T3	24°26'39.33"	117°54'57.61"	粉砂质黏土
	T4	24°26'39.32"	117°54'59.96"	黏土质粉砂
	T5	24°26'39.26"	117°55'4.43"	黏土质粉砂
	T6	24°26'39.30"	117°55'8.1"	粉砂质黏土
	T7	24°26'40.58"	117°55'13.23"	黏土质粉砂
中潮滩	T8	24°26'37.40"	117°55'17.05"	黏土质粉砂
	T9	24°26'34.84"	117°55'21.2"	黏土质粉砂
	T10	24°26'34.19"	117°55'28.55"	黏土质粉砂
	T11	24°26'31.66"	117°55'34.77"	黏土质粉砂
	T12	24°26'31.05"	117°55'40.29"	黏土质粉砂
	T13	24°26'25.76"	117°55'42.99"	黏土质粉砂
	T14	24°26'25.15"	117°55'48.4"	黏土质粉砂
低潮滩	T15	24°26'25.16"	117°55'55.94"	黏土质粉砂
	T16	24°26'24.44"	117°56'0.18"	黏土质粉砂
	T17	24°26'25.85"	117°56'5.05"	黏土质粉砂
	T18	24°26'27.13"	117°56'8.97"	黏土质粉砂
	T19	24°26'29.47"	117°56'14.41"	黏土质粉砂
	T20	24°26'31.37"	117°56'18.85"	黏土质粉砂
潮下带	ST1	24°25'53.29"	117°56'27.37"	中细砂
	ST2	24°26'23.10"	117°56'48.97"	粗中砂
	ST3	24°26'53.22"	117°57'48.99"	细中砂

2.2 研究方法

次表层沉积物 40 °C 烘干，取约 0.2 g 置入烧杯，先后加入 10 mL 浓度 10% 的 H₂O₂ 和浓度 10% 的 HCl，分别去除有机质和碳酸钙。反应 4 h 后加满去离子水，静置约 12 h，之后去除上清液，加入约 5 mL 浓度 5% 的六偏磷酸钠，将烧杯置入超声波仪分散，时间 15 min，之后上机测试，使用美国 Beckman Coulter 公司生产的激光粒度仪(LS13320)测量。将粒度原始数据导入插件 LS13320，绘制粒度曲线，得出平均粒径及各组分百分比，并据各组分百分比判别沉积物岩性。

室温磁性样品使用冷冻干燥机冻干，用玛瑙研

钵轻压磨碎，称取 5~6 g 包在保鲜膜内，装入聚乙烯圆柱形盒并压实固定。磁性参数通过测量或计算得出，首先，测量的参数包括磁化率、非磁滞剩磁和等温剩磁。①低频磁化率(χ_{lf})和 高频磁化率(χ_{hf})使用英国 Bartington 公司生产的 MS2-B 型磁化率仪测量，频率分别为 0.47 kHz 和 4.7 kHz。②非磁滞剩磁(ARM)先用 交变退磁仪(型号 D—Tech2000，交变磁场峰值 100 mT，直流磁场 0.04 mT)退磁，后用 JR6 双向旋转磁力仪测量。③等温剩磁(IRM_{xmT})先用 MPPM10 脉冲磁化仪将磁场从 0 mT 依次加到 1 000 mT，再用 JR6 双向旋转磁力仪测量 IRM_{20mT}、IRM_{40mT}、IRM_{100mT}、IRM_{300mT}、IRM_{1000mT}，到达饱和磁场

(IRM_{1000mT})后反向加磁, 测量 IRM_{20mT}、IRM_{40mT}、IRM_{100mT}、IRM_{300mT}。以下参数通过计算得出: ①频率磁化率百分数 $\chi_{fd}\% = [(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}] \times 100$; ② χ_{ARM} 非磁滞剩磁磁化率 $\chi_{ARM} = ARM / 0.3184$; ③硬剩磁 HIRM = (SIRM + IRM_{300mT}) / 2; ④软剩磁 SOFT = IRM_{20mT}; ⑤饱和等温剩磁 SIRM = IRM_{1000mT}; ⑥退磁参数 $S_{-K}\% = [(SIRM - IRM_{-KmT}) / (2 \times SIRM)] \times 100$, K=20, 40, 100, 300; ⑦比值参数 χ_{ARM} / χ 、 $\chi_{ARM} / SIRM$ 和 SIRM / χ 。粒度和室温磁性测量在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成。

磁性参数的指示意义主要参照潘大东等^[20]: χ 主要反映亚铁磁性矿物含量^[10], SIRM 反映亚铁磁性(如磁铁矿)和不完整反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)的含量^[11]。SOFT 用来指示铁磁物质, 尤其是多畴(MD-multi domain)和单畴(PSD-pseudo single-domain)铁磁晶粒的含量^[10]。HIRM 反映样品中不完整反铁磁性矿物的绝对含量。 $\chi_{fd}\%$, 反映超顺磁性晶粒(SP-super paramagnetic)对磁化率的贡献, 主要用来鉴定沉积物中细的铁磁晶粒(SP-FV), 沉积物 χ_{fd} 含量为 3.2%~5.2%, 反映较多的超顺磁晶粒^[10]。 χ_{ARM} 能敏感反映稳定单畴亚铁磁性矿物颗粒, χ_{ARM} 和 χ_{ARM} / χ 极易受亚铁磁性矿物晶粒大小的影响, 它们的高值反映较细的单畴(SD-single domain)晶粒, 低值指示较粗的多畴(MD)或假单畴(PSD)晶粒^[26]。 $\chi_{ARM} / SIRM$ 的高值一般指示较细的稳定单畴(SSD)

铁磁晶粒^[10, 26-27]。 $S_{-K}\%$ 用来定性区分铁磁性矿物、反映亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物的相对重要性, 值越小, 表明不完整反铁磁性矿物相对含量越高^[28]。SIRM/ χ 可以用于识别矿物类型, 也有助于分辨铁磁晶粒特征^[11, 29]。

3 结果

3.1 粒度特征

粒度分析结果显示, 九龙江口潮滩 4 个地貌单元的沉积物粒度自陆向海逐渐变粗, 颗粒组成差异较为显著(图 2, 表 2)。高潮滩沉积物为粉砂质黏土和黏土质粉砂(表 1), 粒度曲线呈多峰型(图 2a), 主峰 8.94~10.78 μm , 其余峰值分别在 0.34~0.41 μm 、24.95~27.39 μm 和 146.80~213.20 μm , 平均粒径 7.98~12.53 μm 。中潮滩沉积物均为黏土质粉砂, 粒度曲线也呈多峰型(图 2b), 主峰位置大致与高潮滩相当, 平均粒径 9.91~47.89 μm , 除 T11 站位外, 其余均有次峰, 峰值位于 153.80~245.20 μm 。低潮滩沉积物均为黏土质粉砂, 粒度曲线呈多峰型(图 2c), 主峰 9.37~10.29 μm , 其余峰值分别为 0.33~0.36 μm 、26.14~28.70 μm 和 140.10~168.90 μm , 平均粒径 13.17~40.08 μm 。潮下带沉积物粒度曲线呈单峰型(图 2d), 峰值 245.20~324.40 μm , 平均粒径 192.20~381.60 μm , 以中砂、细砂为主, 颗粒较粗。

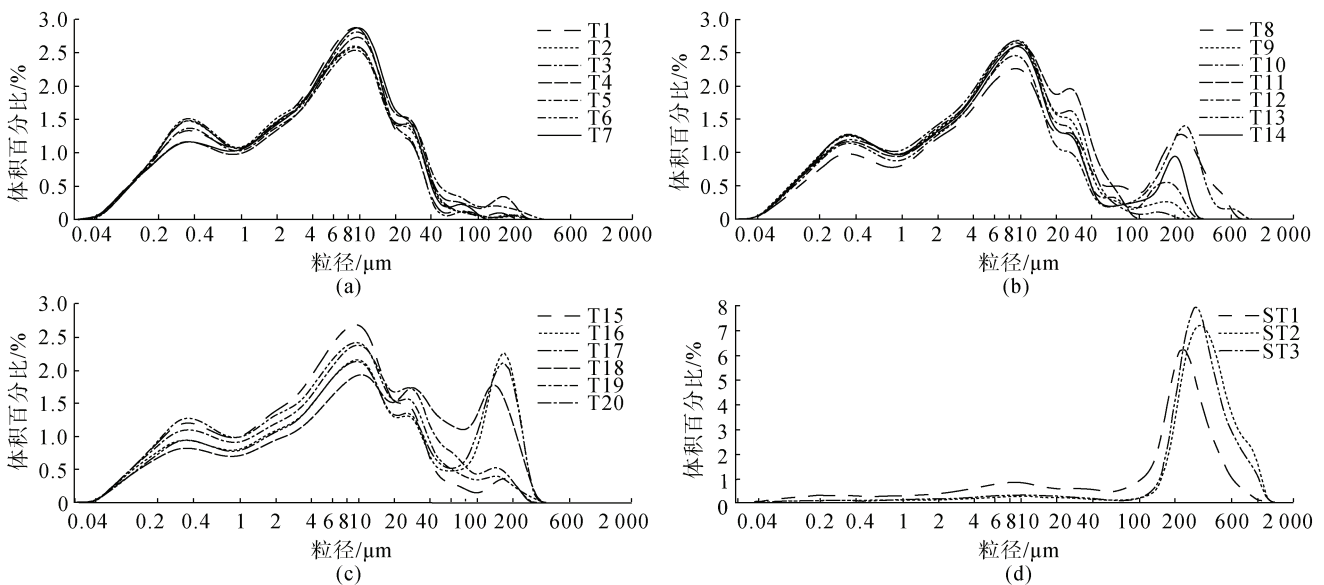


图 2 九龙江口潮滩各沉积微相沉积物粒度曲线

Fig. 2 Volume curves in the particle size for samples from the differential sedimentary microfacies of the tidal flat in the Jiulongjiang Estuary

a. 高潮滩; b. 中潮滩; c. 低潮滩; d. 潮下带

表 2 九龙江口潮滩各站位粒度和室温磁性参数分布
Tab. 2 Grain size and room temperature magnetic parameters of all sites of the tidal flat in the Jiulong Estuary

地貌单元	站位	离岸距 高/m	平均粒 径/ μm	黏土 /%	粉砂 /%	砂/%	$\chi/(10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1})$	$\chi_{\text{fd}}/\%$	SIRM/ $(10^{-6}\text{Am}^2\text{kg}^{-1})$	SOFT/ $(10^{-6}\text{Am}^2\text{kg}^{-1})$	HIRM/ $(10^{-6}\text{Am}^2\text{kg}^{-1})$	$\chi_{\text{ARM}}/$ $(10^{-8}\text{m}^3\text{kg}^{-1})$	χ_{ARM}/χ	$\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ $(10^{-5}\text{m}^3\text{A}^{-1})$	SIRM/ χ $(\text{KA}\cdot\text{m}^{-1})$	$S_{20\text{mT}}/\%$	$S_{40\text{mT}}/\%$	$S_{100\text{mT}}/\%$	$S_{300\text{mT}}/\%$
高潮滩	T1	71	8.127	49.2	49.7	1.1	37.7	4.0	4 967.6	1 160.7	287.4	437.1	11.6	88.0	13.2	62.9	60.1	85.5	94.2
	T2	196	8.536	50.6	48.4	1.0	41.1	3.8	5 131.8	1 244.1	245.9	462.8	11.3	90.2	12.5	61.7	61.0	85.8	95.2
	T3	277	8.686	50.0	49	1.0	39.2	3.6	4 908.8	1 170.0	274.2	433.3	11.1	88.3	12.5	60.7	58.9	84.8	94.4
	T4	354	12.53	44.9	51.7	3.4	48.0	4.7	5 720.5	1 438.2	298.5	447.4	9.3	78.2	11.9	60.2	62.2	86.2	94.8
	T5	483	12.32	47.3	49.4	3.3	49.4	2.7	5 753.9	1 461.8	308.9	455.8	9.2	79.2	11.7	60.2	63.1	86.3	94.6
	T6	566	7.975	50.3	48.7	1.0	37.9	3.9	4 605.5	1 131.5	276.1	455.4	12.0	98.9	12.1	60.3	60.7	85.2	94.0
	T7	672	8.631	46.2	52.8	1.0	39.4	3.1	5 176.0	1 213.3	286.8	474.8	12.1	91.7	13.1	61.1	60.4	86.2	94.5
均值	—	9.5	48.45	50.0	1.7	41.8	3.7	5 180.6	1 259.9	282.5	452.4	10.9	87.8	12.4	61.0	60.9	85.7	94.5	
中潮滩	T8	832	47.89	37.9	44.7	17.4	87.1	2.3	7 319.6	2 000.2	201.1	366.9	4.2	50.1	8.4	56.9	65.6	88.9	97.3
	T9	972	12.29	45.6	51.2	3.2	51.7	3.4	5 924.0	1 598.8	301.8	441.9	8.6	74.6	11.5	59.4	62.0	86.1	94.9
	T10	1 164	15.86	45.7	48.9	5.4	53.2	4.0	5 859.9	1 515.2	598.7	435.3	8.2	74.3	11.0	57.3	62.9	86.6	89.8
	T11	1 373	10.51	43.2	55.9	0.9	44.1	3.8	5 248.2	1 340.8	285.2	434.5	9.9	82.8	11.9	61.0	61.4	85.8	94.6
	T12	1 585	9.911	46.0	52.7	1.3	44.3	3.7	5 219.8	1 329.9	291.1	463.1	10.4	88.7	11.8	61.8	61.2	85.3	94.4
	T13	1 701	42.78	41.9	42.8	15.3	84.9	1.8	7 428.2	1 969.3	309.6	386.7	4.6	52.1	8.8	57.0	64.4	87.6	95.8
	T14	1 891	19.93	45.3	47.1	7.6	56.7	2.4	5 926.3	1 628.4	292.4	408.8	7.2	69.0	10.5	58.7	63.0	87.0	95.1
均值	—	22.7	43.7	49.0	7.3	60.3	3.1	6 132.3	1 626.1	325.7	419.6	7.6	70.2	10.5	58.9	62.9	86.8	94.5	
低潮滩	T15	2 274	13.17	45.3	51.1	3.6	60.8	4.6	6 222.3	1 659.2	312.6	470.0	7.7	75.5	10.2	58.0	60.5	86.5	95.0
	T16	2 368	39.85	36.6	42.9	20.5	148.4	1.9	12 607.7	3 486.0	465.3	370.4	2.5	29.4	8.5	56.1	65.5	88.1	96.3
	T17	2 508	40.08	35.6	43.4	21.0	103.9	1.8	9 828.9	2 666.0	394.8	404.3	3.9	41.1	9.5	57.4	65.2	87.6	96.0
	T18	2 619	38.84	32.0	47.4	20.6	73.3	1.0	7 792.0	2 074.4	344.7	335.5	4.6	43.1	10.6	56.4	65.2	87.2	95.6
	T19	2 721	18.17	41.1	52	6.9	57.9	2.3	6 466.2	1 675.9	326.6	433.9	7.5	67.1	11.2	58.4	62.9	86.5	94.9
	T20	2 838	15.81	44.8	49.8	5.4	57.3	3.1	6 342.2	1 662.6	317.0	438.1	7.6	69.1	11.1	59.2	63.9	86.7	95.0
	均值	—	27.7	39.2	47.8	13.0	83.6	2.5	8 209.9	2 204.0	360.2	408.7	5.6	54.2	10.2	57.6	63.9	87.1	95.5
潮下带	ST1	3 768	192.2	12.9	18.5	68.6	570.1	1.9	40 231.4	11 358.4	987.0	450.7	0.8	11.2	7.1	51.9	69.3	90.1	97.5
	ST2	3 549	381.6	4.0	5.07	90.93	47.6	0.1	2 850.2	887.6	168.1	83.8	1.8	29.4	6.0	51.3	70.0	87.5	94.1
	ST3	3 579	344	4.4	5.8	89.8	249.6	1.1	13 154.4	4 093.8	275.5	162.9	0.7	12.4	5.3	55.6	72.7	91.7	97.9
	均值	—	305.9	7.1	9.8	83.1	289.1	1.0	18 745.3	5 446.6	476.9	232.5	1.1	17.7	6.1	52.9	70.6	89.8	96.5

3.2 磁性特征

将磁性参数分组, 图 3~图 5 分别反映铁磁性矿物的含量、类型和晶粒。 χ 与 SIRM 在高潮滩呈现最

小值, 潮下带最大值, 这与沉积物的平均粒径变化同步, 即从高潮滩至潮下带逐渐增大(表 2, 图 3), 反映亚铁磁性矿物含量自陆向海逐渐增加。

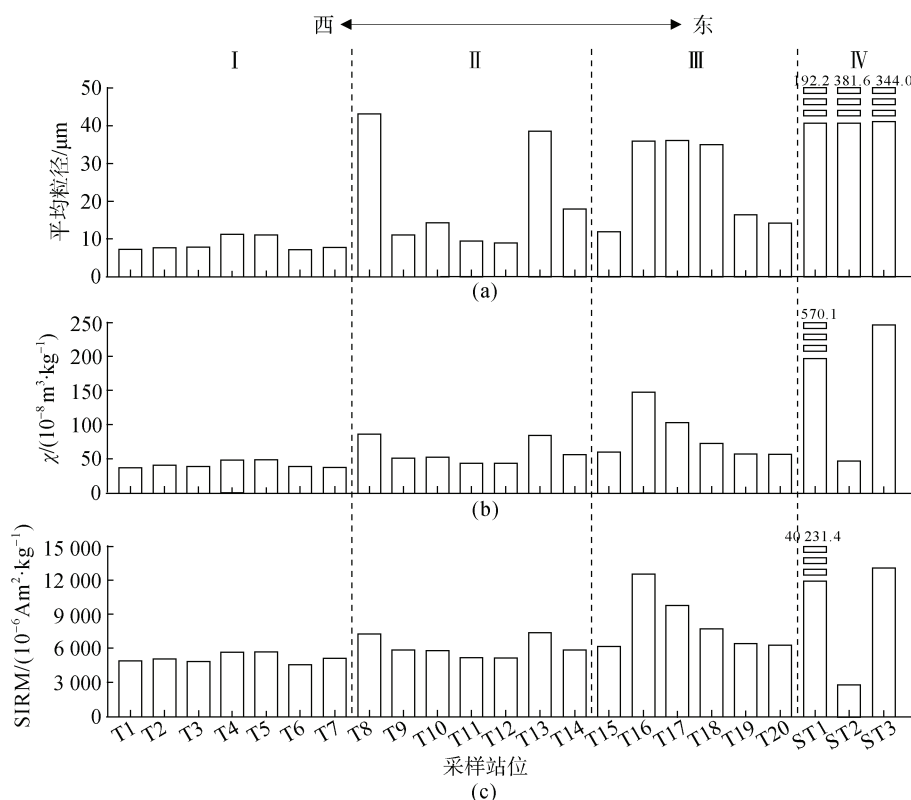


图 3 沉积物平均粒径和反映磁性矿物含量的参数分布
Fig. 3 Mean grain sizes and magnetic parameters of subsurficial sediments
I. 高潮滩; II. 中潮滩; III. 低潮滩; IV. 潮下带

参数 SOFT 在高潮滩最低, 向海逐渐增大, 潮下带最高(图 4a)。参数 HIRM 在中、低潮滩较高, 低值出现在高潮滩, 潮下带 ST2、ST3 站位较低但均值最高(图 4b)。退磁参数 S_{-20mT} 自高潮滩至潮下带逐渐降低, 最高值出现在高潮滩, 中低潮滩相当, 潮下带最低(图 4c)。 S_{-300mT} 在各地貌部位间变化很小, 均值超过 94.5%(图 4d), 反映各地貌部位都以亚铁磁性矿物为主, 最高值出现在潮下带。

指示超顺磁晶粒的参数 $\chi_{fd}\%$ 在高、中潮滩均值超过 3%, 表明这两个区域超顺磁晶粒(SP)含量较多, 低潮滩均值 2.5%, 反映也存在一定的超顺磁晶粒, 潮下带均值 1%, 不含超顺磁晶粒, 这也说明潮下带沉积物中磁性颗粒较粗。磁性参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 也在高潮滩呈现高值, 说明高潮滩磁性矿物晶粒以单畴(SD)为主, 中、低潮滩较高潮滩逐渐降低, 但仍以单畴(SD)为主, 同时伴有一定的假单畴/多畴(PSD/MD)晶粒, 潮下带最低, 指示亚铁磁性

矿物以较粗的假单畴/多畴(PSD/MD)晶粒为主。 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 在低潮滩波动范围大(图 5d, e), T15、T19、T20 出现高值, T16~T18 低值, 反映低潮滩亚铁磁性矿物粗细混合。上述磁性矿物晶粒大小的分布与沉积物粒度粗细分布一致(图 5)。

4 讨论

χ 和 SIRM 自高潮滩至潮下带逐渐增大, 反映磁性矿物的绝对含量自陆向海逐渐增加, 潮下带的显著高值指示该区域具有九龙江口潮滩最高的磁性矿物含量。 S_{-20mT} 在高、中、低潮滩达 60%左右, 潮下带最低 52.9%, 反映不完整反铁磁性矿物含量在潮间带较低而在潮下带较高。HIRM 在潮下带也呈现低值, 验证了不完整反铁磁性矿物在潮下带富集。 S_{-20mT} 高于长江口表层沉积物 S_{-20mT} 的平均值 40%^[20], 反映九龙江口磁性矿物以亚铁磁性矿物为主, 且较长江口富含更丰富的亚铁磁性矿物。

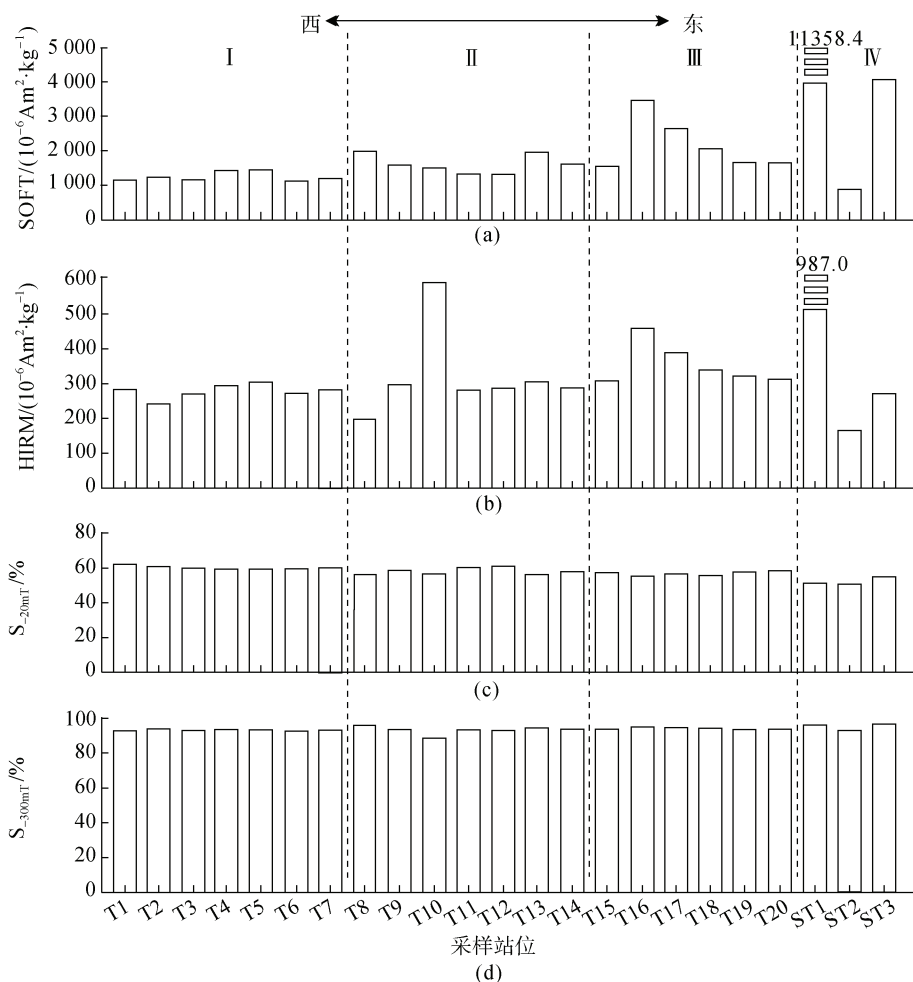


图 4 反映磁性矿物类型的参数分布

Fig. 4 Distribution of magnetic parameters indicating magnetic types

I. 高潮滩; II. 中潮滩; III. 低潮滩; IV. 潮下带

磁性矿物的晶粒大小在九龙江口潮滩存在显著分异规律,粗颗粒的 MD 和 PSD 亚铁磁性矿物富集在潮下带和低潮滩,细颗粒的 SP 和 SD 亚铁磁性矿物富集于高、中潮滩,这与沉积物粒度分布规律一致,揭示九龙江口潮滩磁性矿物受河口水动力控制^[30],即潮下带和低潮滩受潮汐、波浪影响强烈,水动力较强,主要沉积粗颗粒磁性矿物,高潮滩和中潮滩水流速减小^[30],水动力变弱,以悬浮沉积为主,沉积细颗粒磁性矿物。

磁性参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 和 $\chi_{fd}\%$ 在高、中潮滩的高值,反映 SD 和 SP 丰富,揭示细颗粒的亚铁磁性矿物保存较好,磁性矿物溶解作用不显著;同时, $SIRM/\chi$ 的高值、 S_{-20mT} 低值和 S_{-300mT} 高值指示沉积物中存在自生铁硫化物如胶黄铁矿^[29, 32],上述参数显示潮滩无自生铁硫化物(表 2)。因此,

九龙江河口高、中潮滩表层沉积物的早期成岩作用较弱。这可能与九龙江丰富的陆源物质供应及河口潮滩较高的沉积速率有关^[31],揭示了九龙江口潮滩表层沉积物的磁性特征基本反映其陆源输入的特征。

在九龙江河口潮滩沉积微相中,高、中潮滩沉积物矿物磁性参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 和 $\chi_{fd}\%$ 呈现高值,其中 $\chi_{fd}\%$ 反映高、中潮滩富集较细的 SP 颗粒,SP 颗粒在地层中极易受到早期成岩作用的影响而溶解,不适合作为潮滩微相识别的有效指标。低潮滩和潮下带磁性参数 χ 、SIRM 和 SOFT 呈现高值。将站位分为两组:高潮滩、中潮滩和低潮滩、潮下带,做箱形图检查差异性,发现 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 差异较显著。进一步做 *t* 检验,检查两组数据之间差异的显著性,结果显示参数 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的 *P*

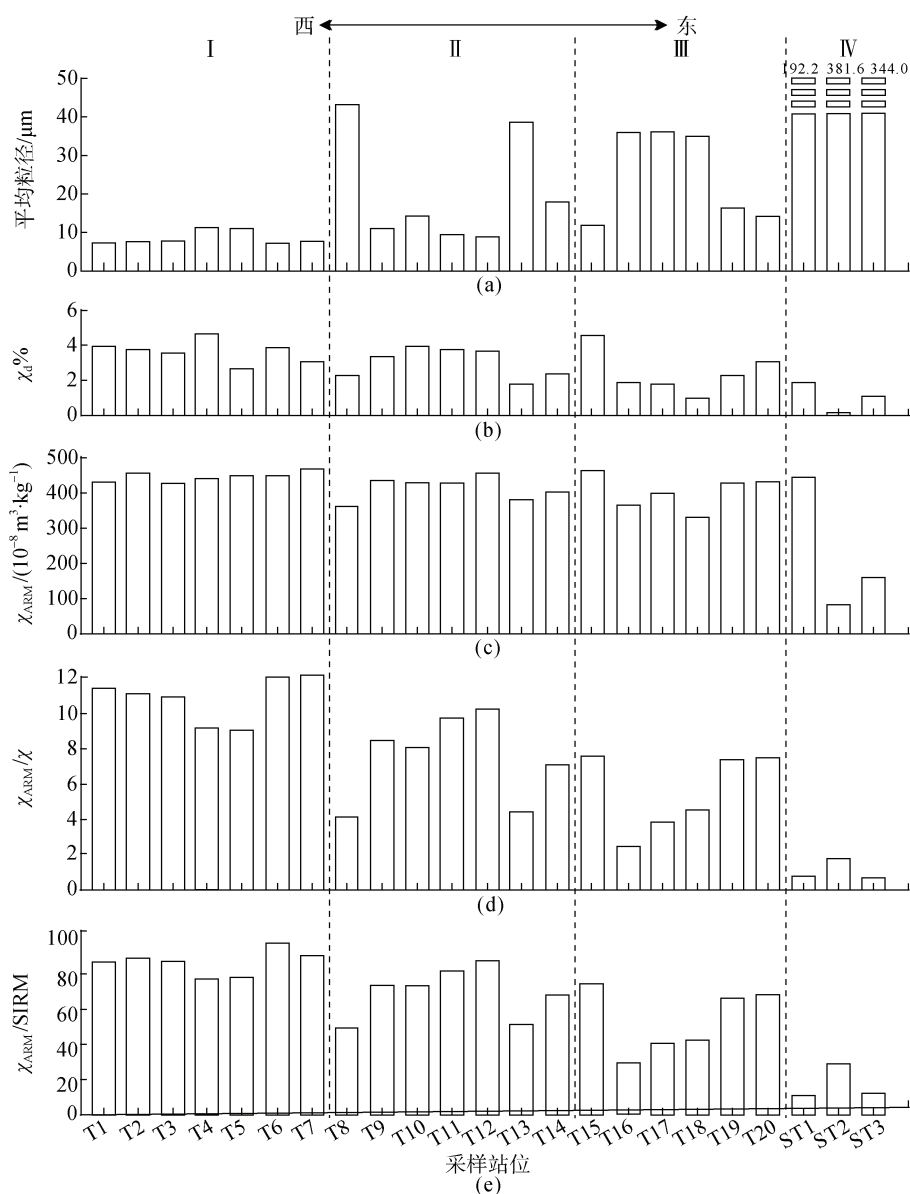


图 5 沉积物平均粒径和反映磁性矿物晶粒参数分布

Fig. 5 Distribution of magnetic parameters indicating the magnetic mineral grain size

I. 高潮滩; II. 中潮滩; III. 低潮滩; IV. 潮下带

值小于 0.01, 为极显著性差异(图 6b, c), 参数 χ_{ARM} 、 χ 、SIRM 和 SOFT 的 P 值大于 0.05, 差异不显著(图 6a, d-f)。因此, 磁性参数组合 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 可作为九龙江河口潮滩古环境高、中潮滩判别指标。这两个磁性参数的均值在高、中、低潮滩均高于长江口潮滩(表 3), 可能与流域源岩有关, 而在潮下带低于长江口, 推测受粒度影响。

5 结论

1) 九龙江河口潮滩次表层沉积物以亚铁磁性矿

物为主, 亚铁磁性矿物的绝对含量由陆向海增加。

2) 磁性矿物在河口潮滩的分布受潮滩沉积动力控制, 粗颗粒的 PSD/MD 铁磁性矿物富集于潮下带和低潮滩, 细颗粒的 SP/SD 亚铁磁性矿物富集于高、中潮滩。

3) 九龙江口潮滩磁性矿物的早期成岩作用弱, 磁性特征基本反映潮滩表层沉积物陆源输入的特征。

4) 磁性参数 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 可作为九龙江口地层潮滩沉积微相高、中潮滩的有效识别指标。

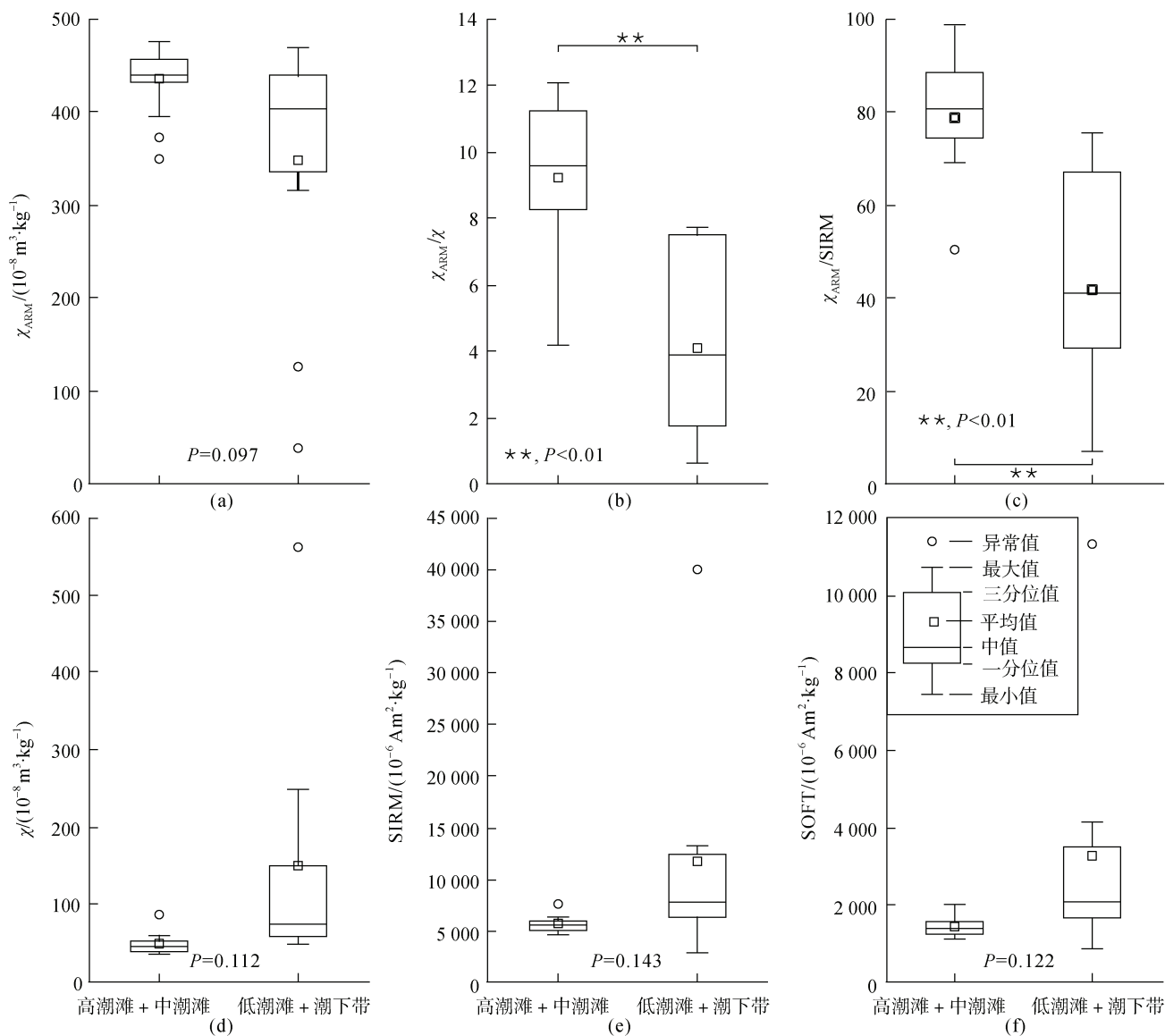


图 6 磁性参数差异性箱形图
Fig. 6 Differentiation of magnetic parameters

表 3 长江口和九龙江口潮滩沉积物平均粒径和磁性参数平均值^[9]
Tab. 3 Average value of the grain size and room temperature magnetic parameters of tidal flat sediments from the Changjiang and Jiulong Estuary^[9]

地貌单元	河口	平均粒径/ μm	χ_{ARM}/χ	$\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}/(10^{-5}\text{m}\cdot\text{A}^{-1})$
高潮滩	长江口	16.8	4.5	51.2
	九龙江口	9.5	10.9	87.8
中潮滩	长江口	22.4	4.4	53.4
	九龙江口	22.7	7.6	70.2
低潮滩	长江口	26.6	3.3	38.3
	九龙江口	27.7	5.6	54.2
潮下带	长江口	92.7	1.6	23.2
	九龙江口	305.9	1.1	17.7

参考文献:

- [1] 潘大东, 王张华. 东亚和南亚典型大河三角洲晚第四纪地层结构及成因对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(1): 12-21.
PAN Dadong, WANG Zhanghua. A comparative study on the Late Quaternary stratigraphic architecture and formation of megadeltas in East and South Asia[J]. Marine geology & Quaternary geology, 2020, 40(1): 12-21.
- [2] VEROSUB K L, ROBERTS A P. Environmental magnetism: Past, present, and future[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978—2012), 1995, 100(B2): 2175-2192.
- [3] EVANS M E, HELLER F. Environmental magnetism: principles and applications of environmagnetics[M]. London: Academic Press, 2003: 56-58.
- [4] ZHANG W, XIN G Y, YU L, et al. Distinguishing sediments from the Yangtze and Yellow Rivers, China: a mineral magnetic approach[J]. The Holocene, 2008, 18(7): 1139-1145.
- [5] WANG Z, LI M, ZHANG R, 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[J]. The Holocene, 2011, 21(3): 393-407.
- [6] FREYR W, BASANP B. Coastal salt marshes[C]// DAVIS R. Coastal Sedimentary Environments. New York: Springer, 1985: 225-301.
- [7] WANG Z, ZHUANG C, SAITO Y, et al. Early mid-Holocene sealevelchange and coastal environmental response on the southern Yangtze delta plain, China: implications for the rise of Neolithic culture[J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 35: 51-62.
- [8] WANG Z, ZHAN Q, LONG H, et al. Early to mid-Holocene rapid sea-level rise and coastal response on the southern Yangtze delta plain, China[J]. Journal of Quaternary Science, 2013, 28(7): 659-672.
- [9] 高晓琴, 王张华, 李琳, 等. 长江口现代潮滩表层沉积物磁性特征和自生铁硫化物的分布[J]. 古地理学报, 2012, 14(5): 673-684.
GAO Xiaoqin, WANG Zhanghua, LI Lin, et al. Magnetic properties of surficial sediments and distribution of authogenic iron sulfide in modern tidal flat at Yangtze estuary[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(5): 673-684.
- [10] 张卫国, 俞立中, 许羽. 环境磁学研究的简介[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(3): 95-105.
ZHANG Weiguo, YU Lizhong, XU Yu. Brief Reviews on environmental magnetism[J]. Progress in Geophysics, 1995, 10(3): 95-105.
- [11] THOMPSON R, OLDFIELD F. Environmental Magnetism[M]. London: Allen and Unwin, 1986.
- [12] ZHANG W, MA H, YE L, et al. Magnetic and geochemical evidence of Yellow and Yangtze River influence on tidal flat deposits in northern Jiangsu Plain, China[J]. Marine Geology, 2012, 319: 47-56.
- [13] ZHEN G Y, KISSE L C, ZHEN G H, et al. Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: magnetic properties, diagenesis and paleoclimate implications[J]. Marine Geology, 2010, 268(1): 34-42.
- [14] 陈艇, 王张华, 强小科, 等. 太湖平原 WJ 孔矿物磁学特征以及晚第四纪海侵事件[J]. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2748-2759.
CHEN Ting, WANG Zhanghua, QIANG Xiaoke, et al. Magnetic properties of minerals recorded by the borehole WJ and Late Quaternary transgressions in the Taihu plain, southern Yangtze Delta[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(8): 2748-2759.
- [15] 俞立中, 许羽, 许世远, 等. 太湖沉积物的磁性特征及其环境意义[J]. 湖泊科学, 1995, 7(2): 141-150.
YU Lizhong, XU Yu, XU Shiyuan, et al. Palaeoenvironmental implication of magnetic measurements on sediment cores from Taihu Lake, East China[J]. Journal of Lake Sciences, 1995, 7(2): 141-150.
- [16] OLDFIELD F, CROWTHER J. Establishing fire incidence in temperate soils using magnetic measurements[J]. Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 249: 362-369.
- [17] CHEN T, WANG Z, WU X, et al. Magnetic properties of tidal flat sediments on the Yangtze coast, China: early diagenetic alteration and implications[J]. The Holocene, 2015, 25(5): 832-843.
- [18] ZHANG W, YU L, HUTCHINSONS M. Diagenesis of magnetic minerals in the intertidal sediments of the Yangtze Estuary, China, and its environmental significance[J]. Science of the Total Environment, 2001, 266(1): 169-175.
- [19] PAN D, CHEN T, ZHAN Q, et al. Mineral magnetic properties of Holocene sediments in the subaqueous Yangtze delta and the implications for human activity and early diagenesis[J]. Quaternary International, 2017, 459: 133-143.
- [20] 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]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(5): 101-111.
- [21] 徐勇航, 陈坚. 台湾海峡西岸闽江口和九龙江口沉积物中碎屑锆石铀-铅定年及物源意义[J]. 海洋学报,

- 2010, 32(4): 110-117.
 XU Yonghang, CHEN Jian. Uranium-lead dating of detrital zircons from the Minjiang and Jiulong Estuaries in the western coast of the Taiwan Strait: implication for its provenance[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(4): 110-117.
- [22] 温克刚, 宋德众, 蔡诗树. 中国气象灾害大典(福建卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 12-16.
 WEN Kegang, SONG Dezhong, CAI Shishu. Meteorological disasters in China (Fujian)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 12-16.
- [23] 福建省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 福建省海岸带和海涂资源综合调查报告[R]. 北京: 海洋出版社, 1990: 48.
 Comprehensive survey leading group office of coastal and tidal flat resource in Fujian province. Comprehensive investigation report of coastal and tidal flat resource in Fujian province[R]. Beijing: China Ocean Press, 1990: 48.
- [24] 曾刚. 厦门港湾海流分布特征[J]. *台湾海峡*, 2006, 6(1): 3-7.
 ZENG Gang. Characteristics of the distribution of the currents in Xiamen Harbour[J]. *J. Oceanogr. Taiwan Strait*, 2006, 6(1): 3-7.
- [25] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第八分册)[M]. 北京: 中国海洋出版社, 1993: 174.
 Editorial committee of Chinese gulf annals. Chinese gulf annals (the first book of eight)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 174.
- [26] MAHERB A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites[J]. *Geophysical Journal International*, 1988, 94(1): 83-96.
- [27] OLDFIELD F. Environmental magnetism—a personal perspective[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(1): 73-85.
- [28] STOBER J C, THOMPSON R. Magnetic remanence acquisition in Finnish lake sediments[J]. *Geophysical Journal International*, 1979, 57(3): 727-739.
- [29] SNOWBALLI F. Magnetic hysteresis properties of greigite(Fe_3S_4) and a new occurrence in Holocene sediments from Swedish Lapland[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1991, 68(1): 32-40.
- [30] 贺松林. 淤泥质潮滩剖面塑造的探讨[C]//陈吉余, 王宝灿, 虞志英, 等. 中国海岸发育过程和演变规律. 上海: 上海科学技术出版社, 1989: 74-80.
 HE Songlin. Analysis of muddy tidal flat profile[C]// CHEN Jiyu, WANG Baocan, YU Zhiying, et al. Development process and evolution of Chinese coast. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1989: 74-80.
- [31] 蔡爱智, 蔡月娥, 朱孝宁, 等. 福建九龙江口入海泥沙的扩散和河口湾的现代沉积[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1991, 11(1): 57-66.
 CAI Aizhi, CAI Yuee, ZHU Xiaoning, et al. Diffusion and modern sedimentation of seaward-transporting discharges in the estuary of Jiulongjiang River, Fujian province[J]. *Marine geology & Quaternary geology*, 1991, 11(1): 57-66.
- [32] WHEELER A J, OLDFIELD F, ORFORD J D. Depositional and post-depositional controls on magnetic signals from saltmarshes on the north-west coast of Ireland[J]. *Sedimentology*, 1999, 46(3): 545-558.

Mineral magnetic characteristics of tidal flat surficial sediments and their implications for sedimentary environment identification in the Jiulong Estuary

PAN Da-dong, LIAO Zi-hui, LIANG Wen-qing, LIU Ya-fei, XIAO Yi-qi, ZHU Chun-jin
(School of History and Geography, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

Received: Mar. 19, 2021

Key words: sedimentary dynamics; magnetic mineral; identification of sedimentary microfacies; tidal flat, Jiulong Estuary

Abstract: This study seeks effective magnetic proxies to recognize sedimentary microfacies in the tidal flat in the Jiulong Estuary to confirm if environmental magnetism is better applied to paleo-environmental and sea-level reconstruction. In this study, 23 subsurficial sediment samples were obtained from the tidal flat in the Jiulong Estuary in four sedimentary environments: upper tidal flat, middle tidal flat, lower tidal flat, and subtidal zone, and their grain size and magnetic properties were measured. Results showed that χ and SIRM increase from the upper tidal flat to the subtidal zone and present considerably high values in the lower tidal flat and subtidal zone, indicating the increase of the absolute content of the magnetic mineral from land to sea. The magnetic parameter assemblage of χ_{ARM} , χ_{ARM}/χ , and $\chi_{ARM}/SIRM$ exhibit high values in the upper to middle tidal flat, whereas low values are obtained in the lower tidal flat and subtidal zone, reflecting that the SP/SD of fine ferromagnetic minerals are enriched in the upper to middle tidal flat, while the PSD/MD of coarse-grained ferromagnetic minerals are enriched in the lower tidal flat and subtidal zone. This reveals that at the Jiulongjiang river mouth, the distribution of magnetic minerals was controlled by the hydrodynamic sorting in the tidal flat. This work proposed that magnetic properties χ_{ARM}/χ and $\chi_{ARM}/SIRM$ are effective indicators to identify the upper tidal flat and middle tidal flat in the late quaternary stratigraphy in the Jiulong mouth.

(本文编辑: 康亦兼)