

长江水下三角洲浅表沉积层中的生物扰动构造*

范德江 徐琳 齐红艳

(中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室 青岛 266100)

提要 为查明长江水下三角洲生物扰动类型、特征和分布规律,探讨生物扰动构造的可能影响因素,使用箱式采样器获取包括三角洲前缘、前三角洲、过渡带以及正常浅海的无扰动沉积岩心,利用高分辨 X-ray 成像技术对浅表沉积层中的生物扰动构造进行了研究。结果表明,长江水下三角洲发育虫孔构造和挖掘构造,虫孔构造直径 0.5—2mm,长度数厘米至数十厘米,多数虫孔垂直于层理发育,挖掘构造形态呈漏斗状,其内沉积物混合强烈;生物扰动构造具有明显的分带性,三角洲前缘生物扰动指数 <1 ,前三角洲及过渡带扰动指数为 2—3 级,最高达 4 级,而紧靠前三角洲的正常浅海生物扰动指数为 2 级。生物扰动构造的发育主要受上覆水体盐度、悬浮体含量制约,在盐度接近正常浅海水体盐度、悬浮体含量中等的前三角洲、过渡带是生物扰动构造发育的有利环境。研究未发现底质沉积物类型、底质环境因子对生物扰动构造的明显制约作用。

关键词 长江水下三角洲, 亚环境, 浅表沉积层, 生物扰动构造

中图分类号 P731

生物扰动构造是沉积物和沉积岩中的基本特征之一,它与营造生物的生态环境息息相关,是古环境恢复和重建的重要识别依据(刘传联等, 2002; Buatois *et al.*, 2002; 费安玮等, 2004; Lüwemark *et al.*, 2004)。底栖生物适应于一定的沉积环境,当沉积环境发生改变时,底栖生物做出相应调整以适应新的沉积环境,这种调整导致生物扰动构造的相应变化,其变化特征、强度和幅度是判断环境变迁和事件沉积过程的有力证据(Cutter *et al.*, 2000; Kniskern *et al.*, 2003)。生物扰动作用产生物质混合,它一方面引起重金属、营养盐、有机污染物等人类活动产物的混合和向下传送,扩大了人类活动的影响深度和广度,这种过程正日益得到科学家的关注(Petersen, *et al.*, 1998; 余婕等, 2004; Benoit *et al.*, 2006); 另一方面也引起了像 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 等用于年代测定的放射性同位素的垂向混合,得到明显偏年轻的表观年代值,成为制约百年尺度精确年代和沉积速率测定的重要因素(Lewis *et al.*, 2002; Yeager *et al.*, 2004)。由于缺乏生物混合作用的数据,大部分已经发表的、包括长江口及临近海域利

用 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 放射性同位素得到的年代数据,都未考虑到生物混合的影响(Su *et al.*, 2002; 李凤业等, 2002; Miralles *et al.*, 2005; 张志忠等, 2005), 这一一定程度上影响了该类数据的精确性(范德江等, 2000)。长期以来,生物扰动构造的研究偏重于古代沉积岩,而疏忽现代沉积物中的生物扰动构造研究。近年来随着 X 射线成像技术的进步和现场观测能力的提高,现代沉积物中的生物扰动构造的研究正迅速开展起来(Richardson *et al.*, 2002; Kniskern *et al.*, 2003; Rosenberg *et al.*, 2005)。

长江口是进行现代大河三角洲沉积作用研究的典型例子。近年来,长江三角洲的沉积作用得到了比较系统的研究,对长江三角洲的发育特征、亚环境和亚相划分、三角洲沉积层序等方面都有了较深入的了解(Chen *et al.*, 2000, 2003; Wang *et al.*, 2005; 李广雪等, 2005)。这期间,开展了长江口及其邻近海域底栖生物学调查研究,对该区底栖生物也有了一定的了解(王金辉等, 2006)。但是,至今为止未见对该区浅表沉积层中生物扰动构造的研究报道。

* 国家重大基础研究发展计划项目, 2005CB422304 号和国家自然科学基金项目, 40676035 号联合资助。范德江, 博士, 教授, E-mail: djfan@ouc.edu.cn

收稿日期: 2007-07-04, 收修改稿日期: 2008-06-06

本文选取涵盖长江三角洲前缘、前三角洲、过渡带、正常浅海的研究剖面,利用高分辨率 X-ray 成像技术对浅表沉积层的生物扰动构造进行了较为系统研究,目的是查明长江水下三角洲生物扰动类型、特征和分布规律,探讨生物扰动构造的可能影响因素,以期为该区的沉积学研究、生态学研究以及人类活动影响研究提供支持和参考,并为更好地解释古代三角洲沉积相和沉积环境提供借鉴。

1 研究区域及站位

研究区位于长江口水下三角洲。根据 Chen 等(2000)的研究结果,本次研究站位涵盖了长江三角洲前缘(20、21 站)、前三角洲(16—18 站)、过渡带(15 站)和正常陆架(11—14 站)等沉积环境,共设计 10 个站位,见图 1。

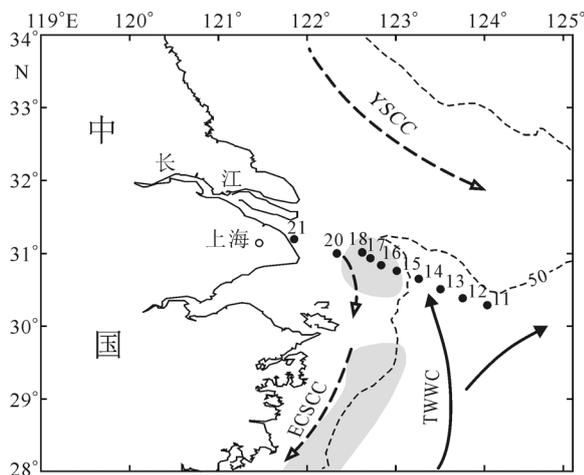


图 1 研究区及站位布设[底图据 Su (1998); Liu 等 (2006)重绘]

图中 TWWC: 台湾暖流; YSCC: 黄海沿岸流; ECSCC: 浙闽沿岸流。阴影区为泥质沉积体

Fig.1 Deployment of the survey stations [the base map was modified after Su (1998) and Liu *et al* (2006)] (TWWC: the Taiwan Warm Current; YSCC: the Yellow Sea Coastal Current; ECSCC: the East China Sea Coastal Current. The shady areas denote muddy deponents)

2 取样及样品处理

于 2006 年 6 月使用东方红 2 号海洋综合调查船进行调查和采样。水体温度、盐度、浊度由 Seabird 100 型温盐深仪(CTD)测定,精度分别为 0.002、0.01‰、0.1 NTU; 表层沉积物 pH 值使用 pHS-3C 型精密酸度计测定,该仪器测量精度为 0.01; Eh 值通过 FJA-2 型

全自动氧化还原电位去极化法测定仪测定,该方法测定误差为 $\pm 10\text{mV}$ 。

使用 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 的箱式采样器采集无扰动浅表沉积物样品,随后用 $6\text{cm} \times 3\text{cm}$ 的特制树脂管插入箱式样品中,获得供 X-ray 成像的柱状沉积物样品,严格密封、并且保持垂直状态室温保存至分析。同时还取了直径分别为 160mm、110mm 的柱状样,供对比研究。

航次结束,立即着手进行柱状沉积物 X-ray 射线成像分析。所用仪器为 SIEMENS-FX 大型 X 射线成像系统,依据长江口的沉积物组成特征,并通过多次成像试验,设定仪器工作条件 16mA/70keV。随后利用相应的图像分析软件对图片进行统计分析,其中的生物扰动程度依据网格法得到,并依据 Taylor 等(1993)的分类方案界定生物扰动指数等级。

此外,表层沉积物样品粒度组成使用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定,粒度参数使用矩法计算得到。

3 结果与讨论

3.1 生物扰动构造类型

长江口水下三角洲生物扰动构造类型比较单一,主要发育虫孔构造和挖掘构造,其中虫孔构造占绝对优势。

虫孔构造:典型的虫孔呈圆管状,管状体平直、弯曲皆有,延伸长度数厘米至数十厘米。虫孔直径小者仅 0.5mm,大者达 2mm;管壁光滑,有时在管壁的边缘出现明显的氧化色,为土黄色、黄色;多数虫孔内无沉积物,而为孔隙水所占据(见封面照片)。虫孔延伸方向与沉积纹层的关系多样,既有垂直于纹层的虫孔,也有与纹理斜交、水平的虫孔,以及网状交叉的虫孔(图 2a, b, c)。根据该类虫孔构造的特点以及在该沉积物表层和内部找到了活体多毛类动物,推测该类虫孔主要为多毛类动物活动留下的痕迹。此外,也见到少量不规则虫孔,虫孔直径为 1.5mm 左右,延伸长度数厘米,管状体的边缘不规则,管内间断地被回填沉积物所填堵(图 2a)。这种不规则虫孔可能为小型食泥动物进食留下的痕迹。

挖掘构造:为柱状体或不规则漏斗状,直径约为 2—4cm,长达数厘米,垂直或斜交于沉积纹层。挖掘构造边缘不规则,其内完全为沉积物充填。由于挖掘构造完全为沉积物充填,充填物基本上属于本层物质,所以挖掘构造不容易识别,但从该构造内沉积物

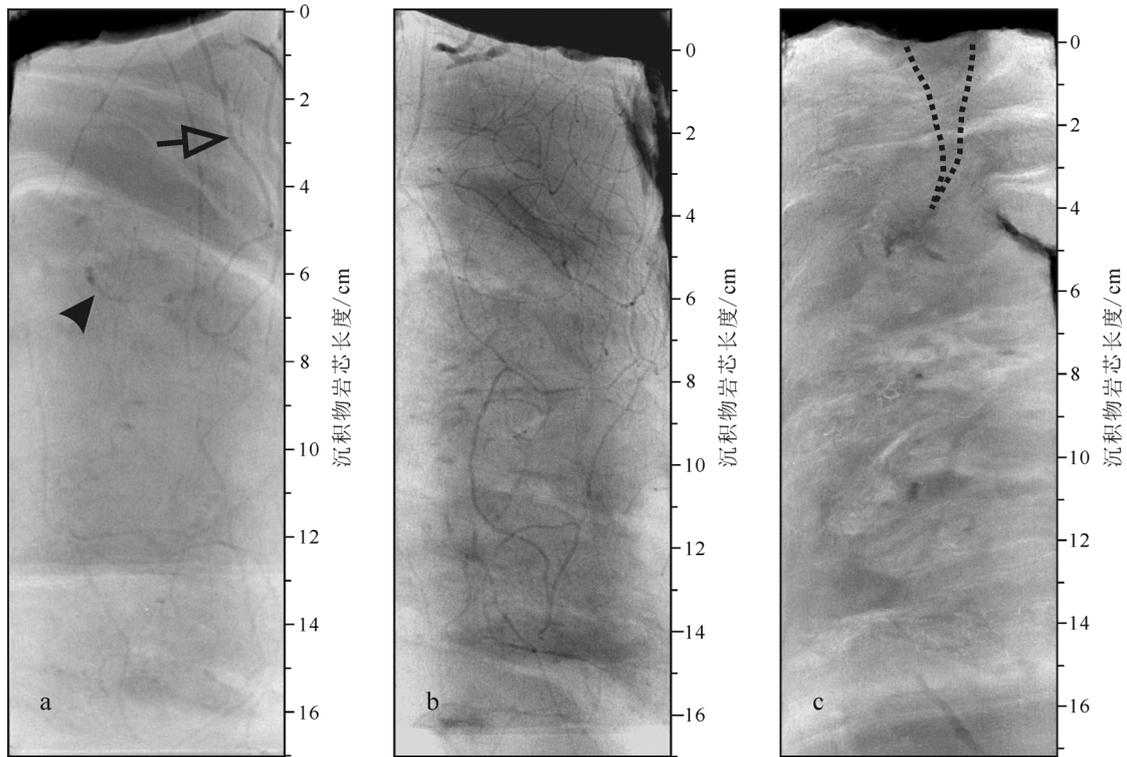


图 2 X 射线负片揭示浅表沉积层中的生物扰动构造

Fig.2 X-radiograph negatives of bioturbation in the surficial sediments

(a. 虫孔构造, 呈深灰色色调, 主要垂直或斜交于纹层分布, 图中实心箭头指示规则虫孔, 空心箭头指示不规则虫孔构造; b. 虫孔构造, 虫孔深灰色, 呈网格状分布; c. 挖掘构造, 图中虚线勾画部分, 另该图片的下部也发育少量虫孔构造)

层理混乱、并且切穿了周围的纹层等方面还能加以区别, 见图 2c。该类生物扰动构造仅见于个别站位。本研究区出现的挖掘构造主要为穴居软体动物、甲壳类动物造成的, 它们是本区的优势种群(王金辉等, 2006), 在柱状沉积物样品中也见到了活体双壳类动物。

3.2 生物扰动构造的分带性

长江水下三角洲各个站位上都不同程度地观察到了生物扰动构造, 其生物扰动构造的类型、发育程度、分异度各具特色。

20 站: 水深在 11m 左右。该处沉积物以粉砂质粘土为主, 偶夹粉砂层, 层理清晰。沉积物中偶见生物扰动构造, 类型单一, 为规则虫孔构造, 呈 U 型管状, 直径 0.8—1.0mm, 延伸数厘米。该站扰动程度 <5%、扰动指数为 0—1 级, 生物扰动弱。见图 3。

18 站: 位于水深 20m 处。该处沉积物为粉砂质粘土, 夹粘土质粉砂薄层, 偶见贝壳碎片, 并见到一个大小 1cm 左右的活体双壳类。该处生物扰动构造较发育, 发育规则虫孔构造和挖掘构造。虫孔呈管状, 直径为 2mm, 延伸长度大于 2cm, 虫孔延伸方向与纹层呈斜交关系; 挖掘构造主要见于 0—15cm 深度内,

呈漏斗状, 上宽下窄, 上部宽度约为 4mm, 下部宽度约为 2mm, 其内沉积物混合强烈, 层理模糊, 但外侧沉积物纹理仍清晰可见。该站生物扰动程度 <22%, 扰动指数为 1—2 级, 生物扰动较弱。见图 3。

17 站: 位于水深 21m 处。该处沉积物主要为粉砂质粘土, 底部偶见细小的贝壳碎片。生物扰动构造发育, 扰动面积达 35%—65%, 其中 0—6cm 深度内生物扰动强烈, 强度程度多在 45% 以上, 向下变弱, 扰动程度在 30%—45%。该站扰动指数达 3 级, 个别达 4 级, 属于中等、强生物扰动。主要发育虫孔构造, 虫孔直径在 0.6—1.0mm, 呈圆形管状、中空、发育氧化边缘, 延伸长度数十厘米; 该虫孔呈网格状分布, 在所观察的 0—21cm 的深度内都很发育。此外, 在该站最表层 0—2cm 间发育了直径达 2mm 左右的虫孔构造, 长度仅数厘米。17 站内也发育少量的不规则虫孔构造, 具有回填痕迹。见图 3。

16 站: 位于水深 21m 处。沉积物主要为粉砂质粘土, 纹层清晰。生物扰动构造较发育, 扰动程度为 10%—25%, 扰动指数为 2 级, 属于弱生物扰动。皆为虫孔构造, 包括规则虫孔和不规则虫孔, 且以规则虫孔

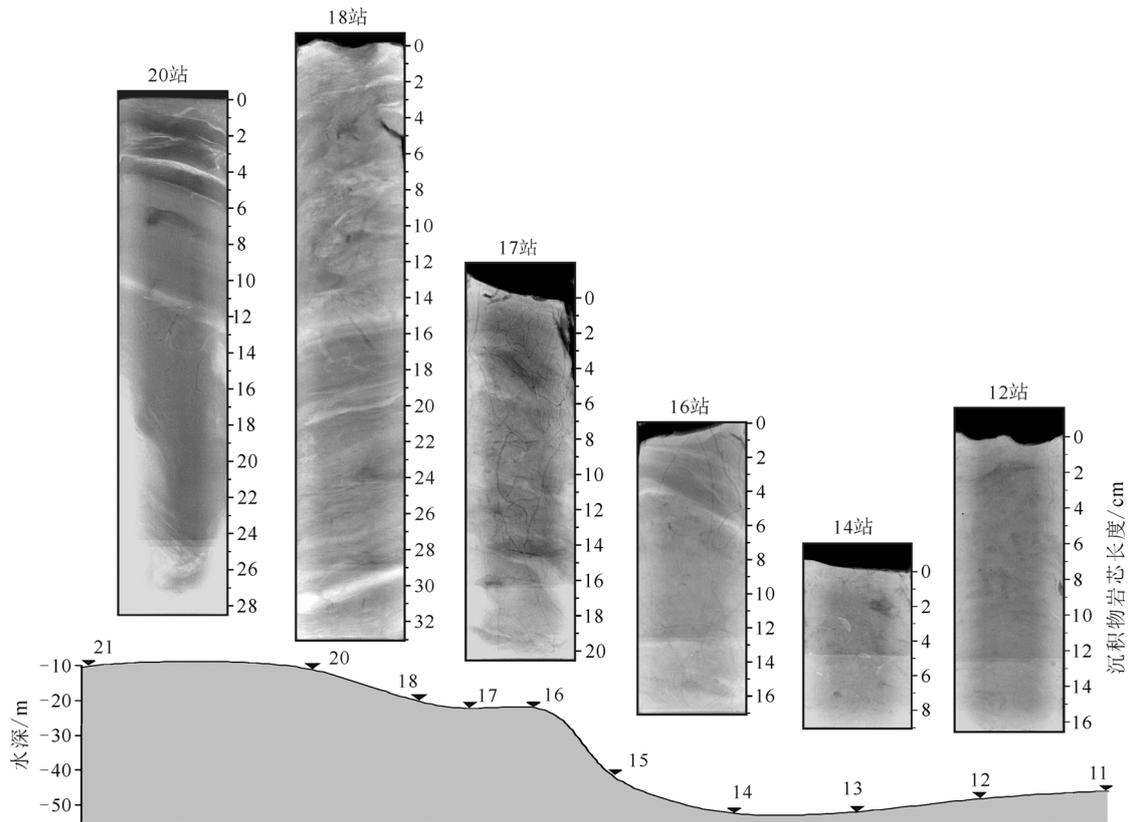


图3 长江水下三角洲生物扰动构造的分带性

Fig.3 Spatial zonation of bioturbation structure in subaqueous Yangtze River Delta

构造为主。规则虫孔构造直径为 1.0—1.5mm, 延伸长度数十厘米, 多垂直纹层分布, 并且穿透沉积层而与底层水相连; 不规则虫孔构造较少见, 直径为 1.5mm 左右, 延伸数厘米, 延伸方向与纹理方向基本一致, 图 3。

14 站: 位于水深 58m 处。沉积物主要为砂, 含大量的贝壳碎片, 其中含有个别完整的贝壳, 层理不显。该站生物扰动构造较发育, 扰动程度 10%—35%, 扰动指数为 2 级。生物扰动构造包含虫孔构造和挖掘构造, 虫孔构造孔壁不光滑, 虫孔直径为 0.5mm 左右, 延伸长度数厘米, 连续性较差, 多数虫孔与层面呈斜交关系, 虫孔分布范围可达 8cm 深处, 但在表层 0—2cm 内最为发育, 且虫孔与底层水相连通。挖掘构造见于 2—6cm 深处, 呈上宽下窄形状, 其内层理杂乱, 与周围正常层序呈过渡关系, 见图 3。

12 站: 位于水深 56m 处。沉积物以细砂为主, 含贝壳碎片, 其中见少量完整的贝壳。生物扰动构造较发育, 扰动程度 10%—30%, 扰动指数为 2 级。主要发育虫孔构造, 虫孔直径为 0.75mm 左右, 延伸长度数厘米至十几厘米, 主要分布于 0—6cm 的层段内, 虫孔延伸方向与层理近于垂直, 虫孔穿透沉积层而

与底层水相连, 见图 3。

此外, 15 站沉积物为粘土质粉沙、粘土质砂, 含较多的贝壳碎片, 分选差; 柱状沉积物中生物扰动构造发育, 于 0—14cm 的深度内发育大量虫孔构造, 虫孔直径为 2mm 或更粗, 延伸数厘米至十几厘米, 延伸方向与纹层斜交。

从长江水下三角洲 20—11 站的生物构造发育看, 可以分为三个带: 无-弱生物扰动带(20 站及以浅部分)、中等生物扰动带(大致 18 站至 15 站)和弱生物扰动带(14 站及以深海域)。无-弱生物扰动带生物扰动构造类型单一, 分布零星, 层理清晰, 扰动指数小于 1; 中等生物扰动带生物构造类型多, 包括虫孔构造、挖掘构造, 且虫孔构造种类复杂, 发育规则虫孔和不规则虫孔、大型虫孔和小型虫孔, 层理保存较好, 该带扰动指数为 2—3 级; 弱生物扰动带位于砂质沉积区, 发育虫孔构造和挖掘构造, 层理模糊, 生物扰动指数为 2 级。

3.3 生物扰动构造与沉积环境的关系

3.3.1 底质类型和物理化学环境的影响 生物扰动构造是由底栖生物生命活动过程中产生的, 底栖

生物直接生活于沉积物内部或表面, 所以与沉积物类型以及沉积物所处的物理化学环境有着一定的相关。

在从河口到正常浅海的方向上, 沉积物包含两类, 其一为粉砂质粘土, 发育于三角洲前缘、前三角洲亚环境(21—16 站); 其二为含贝壳碎片砂, 发育于正常浅海环境(14—12 站); 而 15 站沉积物由粘土-粉砂-砂构成, 含有贝壳碎片, 明显地介于上述两类沉积物的中间类型, 属于三角洲环境和正常浅海的过度处。不同沉积物这种差别在平均粒径、砂含量上也得到很好地显示, 16—21 站平均粒径约为 6.86Φ , 砂含量约为 3.36%; 12—14 站平均粒径约为 3.75Φ , 砂含量约为 73.55%; 15 站沉积物明显属于过度性质, 其平均粒径、砂含量分别为 5.27Φ 、42.55%。考察该断面生物扰动程度的分带特征, 无扰动、中等扰动构造发育于粉砂质粘土沉积中, 砂质沉积中发育弱生物扰动构造, 反映生物扰动构造的发育程度与沉积物类型之间没有特别的联系。但是, 不同沉积物中生物扰动构造的类型、保存得完好程度有所差别, 粘土质沉积中主要出现虫孔构造、形状保存完好; 而砂质沉积中既有虫孔构造, 也有挖掘构造, 生物构造的完整性较差。

Eh、pH 是海洋沉积物中反映物理化学状态的两个综合性指标。所研究的断面, 表层沉积物的属于中性-弱碱性环境, pH 值变化于 7.06—7.78 之间, 16—20 站偏中性、12—15 站偏弱碱性; 表层沉积物总体上为还原环境, Eh 变化于 -200—300mV 之间, 除了个别站位偏高(如 18 站)外, 大部分站位在 -275mV 左右, 差别不明显。该断面上 pH、Eh 并没有出现明显差别, 仅表明在该范围内适合底栖生物的生存, 尚不能判断它们对生物扰动程度的制约作用。

3.3.2 上覆水体环境的影响 上覆水体一方面带来营养物质, 另一方面通过水体-沉积物界面过程直接影响了表层沉积物中空隙水的性质, 进而影响底栖生态环境。盐度、温度、浊度是水体基本环境要素, 它们基本反映了水团的性质。

从 21—11 站, 跨越了长江水下三角洲不同亚环境和正常浅海环境, 水体的实测盐度、温度、浊度特点见图 4。在 0—70km 范围内(三角洲前缘亚环境), 是河水与海水剧烈混合的区域, 该区域盐度从 4 迅速增加至 30, 盐度垂向混合均匀、水平方向梯度大; 该范围内水体浊度很高, 其值都在 50 FTU 以上, 其中 21 站因悬浮体含量特别高, 无法使用 CTD 进行测定,

该站 2003 年 6 月实测悬浮体含量可达 150mg/L 以上(翟世奎等, 2005); 该区域水体温度也较高, 并且从陆向海方向呈现下降趋势。由于三角洲前缘亚环境盐度变化迅速, 悬浮沉积物含量很高, 沉积速率高, 底栖生物难以生存, 所以该带内生物扰动弱, 扰动指数小于 1, 生物扰动构造类型单一, 仅出现虫孔构造。

大致从 70—110km(前三角洲亚环境), 盐度从 30 逐渐增加至 33, 盐度表层低、向下增高, 垂向层化明显; 该区域水体浊度高, 分层明显, 表层不足 1 FTU, 底层超过 100 FTU; 该带内温度变化比较复杂, 总体趋势是表层温度较高, 向下降低, 横向温度不均匀。前三角洲亚环境盐度变化平缓, 并且接近于正常浅海的盐度值, 同时该处水体中悬浮体含量较高, 通过河流带来的营养物质可以到达该区域, 有利于底栖生物的生存和发展, 故该带生物扰动强烈, 扰动指数为 2—3 级。但是该带内生物扰动构造在横向分布上亦有差异, 近三角洲前缘侧(18 站)因悬浮体浓度高达 100 FTU 以上, 盐度较低, 生物扰动构造相对较弱, 扰动指数 1—2 级, 而其它部分生物扰动作用强烈, 最强处见于该带的中部(17 站), 最大扰动指数达 4 级。

从 110—130km(过渡带), 海水盐度接近正常浅海的盐度, 变化于 33—34 之间, 向海方向略有增加; 在该狭窄的区域内, 底层浊度介于 5—50 FTU 之间, 并且向海方向趋于降低, 而表层浊度很低, 小于 0.1 FTU; 水体温度表层高、底层较低。该带另一个突出的特征是盐度、温度等值线从底层向上隆起, 反映了底层水体向上运动, 为台湾暖流边界处的上升流发育区(Lu *et al.*, 2006)。过渡带海水的盐度已经达到了正常浅海的水平, 但该处悬浮体的含量明显高出正常浅海, 并且又是上升流发育区, 从河流带来的营养物质和上升流带来的营养物质极大地丰富了该海域的营养供给, 有利于底栖生物的生存, 生物扰动作用强烈, 这在直径为 160mm 的岩心柱状沉积物样品中表现得很清楚。

从 130km 起, 属于正常浅海环境, 底层盐度约为 34, 表层盐度为 32 左右; 水体干净, 浊度值在 5 FTU 以下, 其中表层浊度不足 0.1 FTU, 底层浊度为 5 FTU 左右; 该带水体温度较高。正常浅海环境盐度、温度已经不受长江入海水体的影响, 长江入海的悬浮体也难以穿过台湾暖流而到达该带(郭志刚等, 2002), 相对地该海域营养物质较少, 生物扰动程度较前三角洲环境低, 生物扰动指数为 2 级。

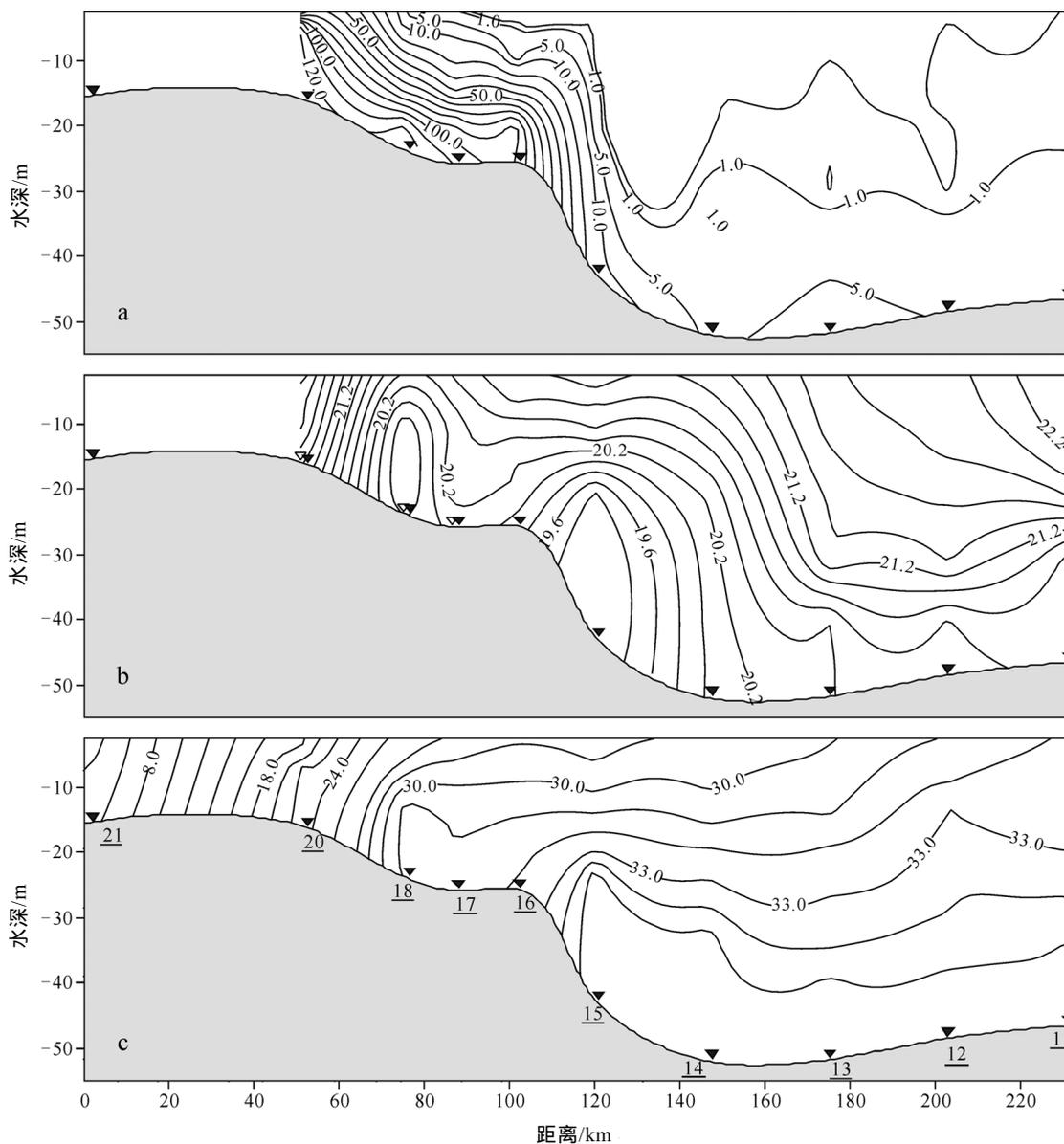


图4 长江水下三角洲水体浊度、温度、盐度空间分布特征

a. 浊度 (FTU); b. 温度 (°C); c. 盐度

Fig. 4 Distributions of total suspended matter, water temperature, and salinity in subaqueous Yangtze River Delta a. turbidity (FTU); b. water temperature (°C); c. water salinity

综上所述,把长江水下三角洲各亚环境中的生物扰动构造以及环境特征归纳于表1。在生物扰动作用强烈的环境下,沉积物混合作用明显,导致 ^{210}Pb 等核素向下层沉积物混合,使得 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ -深度曲线斜率增加,据此得到的沉积速率偏大;同样地,强烈的生物扰动也导致 ^{137}Cs 峰值的宽化,不利于依据它进行精确年代确定。在利用 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 等核素进行沉积速率测定时,尽量避免生物扰动强烈的环境。同样原因,在进行高分辨沉积记录研究中,也需要考虑生物扰动构造的影响。

4 结论

(1) 长江水下三角洲发育虫孔构造、挖掘构造等生物扰动构造。单个虫孔构造直径为0.5—2mm,长度数厘米至数十厘米,多数虫孔垂直于层理发育,并且与底层水体相连通;挖掘构造形态呈漏斗状,其内沉积物混合强烈。

(2) 长江水下三角洲生物扰动构造具有明显的分带性。三角洲前缘仅零星发育生物扰动构造,生物扰动指数 <1 ;前三三角洲及过渡带生物扰动构造发育,

表 1 长江水下三角洲中的生物扰动构造及环境特征
Tab.1 Bioturbation and environmental features in subaqueous Yangtze(Changjiang) River Delta

环境单元	三角洲前缘	前三角洲	过渡带	正常浅海
生物扰动构造	扰动构造类型单一, 弱-无扰动, 扰动指数<1	扰动构造类型多, 中等扰动, 扰动指数 2—3	扰动构造多样, 中强扰动	扰动构造类型较多, 弱扰动, 扰动指数 2
环境特征	盐度: 4—30 温度: >20 浊度: >50FTU 底质: 粉砂质粘土 pH: 7.41 Eh: -280mV	盐度: 30—33 温度: 20 ± 浊度: 100FTU± 底质: 粉砂质粘土 pH: 7.06—7.23 Eh: -200—280mV	盐度: 33—34 温度: 19 ± 浊度: 5—50FTU 底质: 砂-粉砂-粘土 pH: 7.61 Eh: -283mV	盐度: 34 温度: 20 ± 浊度: <5FTU 底质: 含贝壳砂 pH: 7.29—7.78 Eh: -200—265mV

类型多样, 扰动指数为 2—3 级, 最高达 4 级; 紧靠三角洲的正常浅海生物扰动程度较发育, 扰动指数为 2 级。

(3) 生物扰动构造的发育与上覆水体环境因子密切相关, 盐度接近正常浅海盐度(30—34)、悬浮体含量中等(10—100 FTU)的前三角洲亚环境、过渡带是生物扰动构造发育的有利环境; 盐度剧烈变化、悬浮体含量高的河口区不利于生物扰动构造的形成。研究未见生物扰动构造与底质沉积物类型、底质物理化学因子之间存在特别的联系。

致谢 由于东方红 2 全体船员和 2006 年 6 月份长江口航次的所有调查队员的积极参与, 使得本研究涉及到的外业调查和取样任务顺利完成; 中国海洋大学生命学部的于子山副教授协助鉴定沉积物的底栖生物, 谨致谢忱。

参 考 文 献

王金辉, 徐韧, 秦玉涛等, 2006. 长江口基础生物资源现状及年及变化趋势分析. 中国海洋大学学报, 36(5): 821—828
刘传联, 房殿勇, 王慧中, 2002. 从生物扰动构造看古近纪东营湖的湖水分层. 现代地质, 16(1): 59—64
李广雪, 杨子庚, 刘勇, 2005. 中国东部海域海底沉积环境成因研究. 北京: 科学出版社, 1—65
李凤业, 高抒, 贾建军等, 2002. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率. 海洋与湖沼, 33(4): 365—369
余婕, 刘敏, 侯立军等, 2004. 底栖穴居动物对潮滩 N 迁移转化的影响. 海洋环境科学, 23(2): 1—4
张志忠, 李双林, 董岩翔等, 2005. 浙江近岸海域沉积物沉积速率及地球化学. 海洋地质与第四纪地质, 25(3): 15—24
范德江, 杨作升, 郭志刚, 2000. 中国陆架 Pb-210 应用现状与思考. 地球科学进展, 15(3): 297—302
费安玮, 刘成林, 甘军等, 2004. 鄂尔多斯盆地三道坎组混合沉积的生物扰动构造与古地理. 中国地质, 31(4): 347—355
郭志刚, 杨作升, 张东奇等, 2002. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体输运的阻隔作用. 海洋学报, 24(5):

71—80
翟世奎, 张怀静, 范德江等, 2005. 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系. 环境科学学报, 25(5): 693—699
Benoit J M, Shull D H, Robinson P *et al*, 2006. Infaunal burrow densities and sediment monomethyl mercury distributions in Boston Harbor, Massachusetts. *Marine Chemistry*, 102: 124—133
Buatois L A, Mángano M G, 2002. Sequence stratigraphic and sedimentologic significance of biogenic structures from a late Paleozoic marginal- to open-marine reservoir, Morrow Sandstone, subsurface of southwest Kansas, USA. *Sedimentary Geology*, 152: 99—132
Chen Z, Song B, Wang Z *et al*, 2000. Late Quaternary evolution of the subaqueous Yangtze Delta, China: sedimentation, stratigraphy, paleontology, and deformation. *Marine Geology*, 162: 423—441
Chen Z, Saito Y, Hori K *et al*, 2003. Early Holocene mud-ridge formation in the Yangtze offshore, China: a tidal-controlled estuarine pattern and sea-level implications. *Marine Geology*, 198: 245—257
Cutter G R, Diaz R J, 2000. Biological alteration of physically structured flood deposits on the Eel margin, northern California. *Continental Shelf Research*, 20: 235—253
Kniskern T A, Kuehl S A, 2003. Spatial and temporal variability of seabed disturbance in the York River subestuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58: 37—55
Lewis R C, Coale K H, Edwards B D *et al*, 2002. Accumulation rate and mixing of shelf sediments in the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, 181: 157—169
Liu J P, Li A C, Xu K H *et al*, 2006. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinof orm deposit in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 26: 2141—2156
Lu X, Qiao F, Xia C *et al*, 2006. Upwelling off Yangtze River estuary in summer. *Journal of geophysical research*, 111, C11S08, 1—19
Lüwemark L, Schönfeld J, Werner F *et al*, 2004. Trace fossils as a paleoceanographic tool: evidence from Late Quaternary sediments of the southwestern Iberian margin. *Marine Ge-*

- ology, 204: 27—41
- Miralles J, Radakovitch O, Aloisi J C, 2005. ^{210}Pb sedimentation rates from the Northwestern Mediterranean margin. *Marine Geology*, 216: 155—167
- Petersen K, Kristensen E, Bjerregaard P, 1998. Influence of Bioturbating Animals on Flux of Cadmium into Estuarine Sediment. *Marine Environmental Research*, 45(4/5): 403—415
- Richardson M D, Briggs K B, Bentley *et al*, 2002. The effect of biological and hydrodynamic processes on physical and acoustic properties of sediments off the Eel River, California. *Marine Geology*, 182: 121—139
- Rosenberg R, Ringdahl K, 2005. Quantification of biogenic 3-D structures in marine sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 326: 67— 76
- Su C C, Huh C A, 2002. ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239, 240}\text{Pu}$ in East China Sea sediments: sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides. *Marine Geology*, 183: 163—178
- Su Jilan, 1998. Circulation dynamics of the China seas north of 18N coastal segment. In: Robinson A R, Brink K H ed. *The Sea*. Volume 11, Chapter 16. New York, John Wiley & Sons Inc, 483—505
- Taylor A M, Goldring R, 1993. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric. *Journal of the Geological Society*, 150 : 141—148
- Wang Z, Saito Y, Hori K *et al*, 2005. Yangtze offshore, China: highly laminated sediments from the transition zone between subaqueous delta and the continental shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62: 161—168
- Yeager K M, Santschi P H, Rowe G T, 2004. Sediment accumulation and radionuclide inventories ($^{239, 240}\text{Pu}$, ^{210}Pb and ^{234}Th) in the northern Gulf of Mexico, as influenced by organic matter and macrofaunal density. *Marine Chemistry*, 91: 1—14

BIOTURBATION IN SURFICIAL SEDIMENTS OF SUBAQUEOUS CHANGJIANG (YANGTZE) RIVER DELTA

FAN De-Jiang, XU Lin, QI Hong-Yan

(Key Lab of Submarine Geosciences and Technology of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, 266100)

Abstract The structure, spatial distribution, and controlling factors of bioturbation in subaqueous Changjiang (Yangtze) River Delta were studied. Serial undisturbed surficial sediment cores covering the sub-environments of the subaqueous delta were collected using box sampler and then examined with high-resolution X-ray photograph method. The results show that biogenic tubes and borrows are two major forms of bioturbation. The tubes are 0.5—2.0mm in diameter, and several to tens centimeters in length; most of them are perpendicular to laminations. The borrows are funnel-shaped, in which sediments are strongly disturbed. The bioturbation distributed in zonation and intensified in the deltaic region from delta front, prodelta, and transition zone, which was mainly controlled by bottom water salinity and turbidity. Having moderate total suspended matter supply and close to shallow sea water salinity, the prodelta and transition zone favor the development of bioturbation. In addition, no close relations of bioturbation to surface sediment type and pH or Eh state were found.

Key words Yangtze River Delta, Sub-environment, Surficial sediment, Bioturbation