

# 珠江三角洲潮坪沙蚕遗迹的组成和分布特征及其对沉积环境的指示作用

王媛媛<sup>1,2</sup>, 杨邬<sup>1</sup>, 张国成<sup>1,2</sup>

1. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454003

2. 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室, 河南焦作 454003

**摘要** 【目的】珠江三角洲潮坪沉积环境复杂, 沙蚕遗迹丰富, 研究现代沙蚕遗迹的组成与分布特征及其与沉积环境的关系, 对重建古环境具有重要的实证价值。【方法】以珠江三角洲潮坪为研究对象, 运用现代沉积学及遗迹学方法, 通过粒度、TOC、盐度、浊度分析, 结合 X 射线计算机断层扫描三维重构方法, 对研究区内现代沙蚕遗迹的组成与分布特征进行了精细研究, 并分析了遗迹分布与沉积环境和物化条件的关系。【结果】(1) 双齿围沙蚕主要生活在珠江三角洲的水下河道和分流间海湾的潮坪区域。(2) 双齿围沙蚕的遗迹主要有觅食迹和居住迹, 但层面上的觅食迹不易观察到, 层内居住迹形态主要有简单的 Y 形、I 形和 U 形以及复杂网状结构, 连接处有鼓包。(3) 双齿围沙蚕适合生活在水动力条件较为低能、盐度较低、浊度较低、总有机碳含量丰富的分流间湾潮坪或水下河道中。【结论】沙蚕遗迹在空间分布上具有不均衡性, 多种环境条件共同控制沙蚕遗迹的丰度。沙蚕居住迹与遗迹化石 *Polykladichmus* 相似, 该遗迹化石可属于 *Mermia* 遗迹相和 *Glossifunites* 遗迹相, 该遗迹化石组合主要出现在潮间带和潮道区域。该研究补充了现代沙蚕遗迹的生物学资料。

**关键词** 珠江三角洲; 潮坪; 现代沙蚕遗迹; 沉积环境

**第一作者简介** 王媛媛, 女, 1984 年出生, 博士, 副教授, 沉积学、遗迹学, E-mail: yyw@hpu.edu.cn

**中图分类号** Q911 **文献标志码** A

## 0 引言

遗迹学是研究古代和现代生物在沉积物层面和层内活动时遗留下来的痕迹的学科<sup>[1-2]</sup>, 与生态条件、沉积物性质、沉积环境有着密切的关系。研究现代生物遗迹的特点、分布和组合特征及其与沉积环境、沉积物性质的关系, 对遗迹化石及古环境研究具有重要的实证价值<sup>[3]</sup>。

国内外学者对现代沙蚕遗迹进行了较为深入的研究。从形态上, 主要研究了加拿大弗雷泽河三角洲和滦河三角洲潮坪的沙蚕潜穴形态特征<sup>[4-8]</sup>, 印度昆达利卡河口环境中的沙蚕潜穴及粪便颗粒的形态特征<sup>[9]</sup>, 黄河三角洲和珠江三角洲潮坪沙蚕遗迹的形态特征与共生关系<sup>[10-13]</sup>。从分布规律上, 主要研究了弗雷泽河三角洲、滦河三角洲以及黄河三角洲的沙蚕遗迹分布规律<sup>[12,14-16]</sup>。古遗迹化石的类比方面, 主要比较了现代沙蚕居住迹与遗迹化石

收稿日期: 2024-02-20; 收修改稿日期: 2024-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172130); 河南省本科高校青年骨干教师培养计划 (2023GGJS055) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42172130; Yong Backbone Teachers Training Program of Henan Province, No. 2023GGJS055]

*Polykladichnus*<sup>[10]</sup>, 在三角洲前缘和前三角洲利用遗迹化石区分不同的物理化学应力<sup>[15]</sup>。从古环境重建的角度, 主要研究了与现代沙蚕遗迹相似的遗迹化石 *Polykladichnus* 所代表的沉积环境, 应用综合方法进行古环境重建<sup>[17-26]</sup>。然而, 我国潮坪沉积现代沙蚕遗迹的研究还处于起步阶段。本文通过精细的三维化研究, 得到珠江三角洲潮坪沙蚕遗迹与沉积环境及物化条件的关系, 并与相似遗迹化石进行对比分析, 旨在为珠江三角洲潮坪沉积环境补充生物学资料, 及为古三角洲潮坪环境的重建提供实证。

## 1 研究区概况

珠江三角洲位于广东省中南部、珠江下游, 濒临南海, 112°45'~113°50' E、21°31'~23°10' N, 是由珠江水系的西江、北江、东江及其支流潭江、绥江、增江带来的泥沙在珠江口河口湾内堆积而成的复合型三角洲(图1)。珠江三角洲大部分在北回归线以南, 地处南亚热带, 属亚热带海洋季风气候, 流域面积  $45 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 雨量充沛, 热量充足, 雨热同季。年日照为 2 000 h, 四季分布比较均匀。年平均气温 21.4 °C~22.4 °C, 年平均降雨量 1 600~2 300 mm<sup>[27]</sup>。

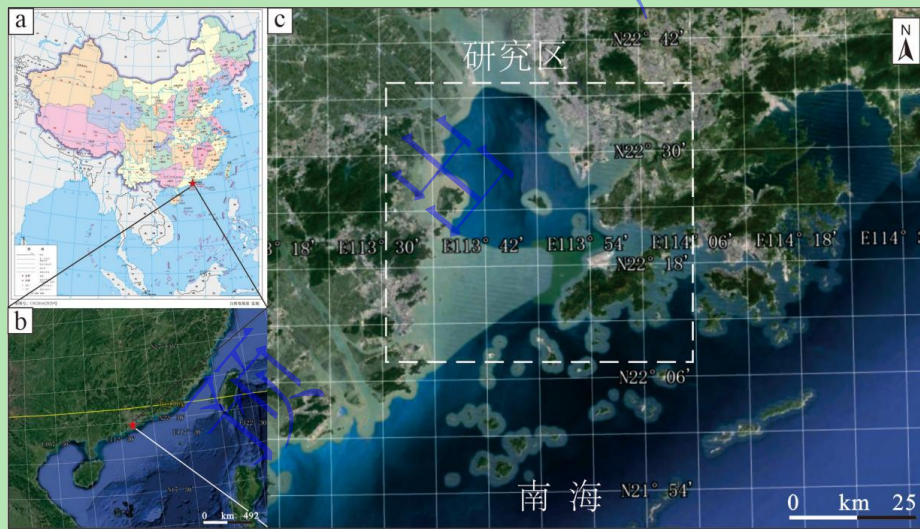


图1 研究区位置图

(a) 中国地图, 星号表示研究区域; (b) 研究区区位图 (Google Earth Pro); (c) 珠江三角洲 (Google Earth Pro)

Fig.1 Location of the study area

(a) Map of China, asterisks indicate research area; (b) study area bitmap (Google Earth Pro); (c) Pearl River Delta (Google Earth Pro)

珠江三角洲河口潮汐主要受地形地貌、上游河流径流动力与海洋潮汐动力等变化影响, 为不规则半日潮, 在一个太阴日里分别出现两次高潮、两次低潮, 但潮差、涨落潮历时不等<sup>[28]</sup>。珠江三角洲平均潮差在 0.85~1.62 m 之间, 属于弱潮河口<sup>[29-31]</sup>, 河网面积达  $9\,750 \text{ km}^2$ , 河网密度介于  $0.68\sim 1.07 \text{ km/km}^2$  之间<sup>[32-33]</sup>。

## 2 研究方法

选取珠江三角洲潮坪的沉积物和现代沙蚕遗迹作为野外考察对象,对沉积物性质和沙蚕遗迹的形态学、沉积学和遗迹学进行研究。通过手持 GPS 进行采样点定位,对采集研究点的沉积物样品(6个)进行粒度和总有机碳(TOC)含量分析。同时,采集水样6个,用于测定盐度和浑浊度。

## 2.1 取样

采样点位于广东省中山市和珠海市沿岸,通过 GPS(全球定位系统)确定各个采样点位置,并在 Google Earth Pro 进行标记绘制地图,黑色圆点标记发现沙蚕的点位(图2),共六个采样点发现沙蚕。在研究区内各个采样点中,使用 PVC 管对形态保存完好且有代表性的生物潜穴进行取心,所使用的 PVC 管直径为 5 cm 和 7.5 cm,高度为 15 cm。

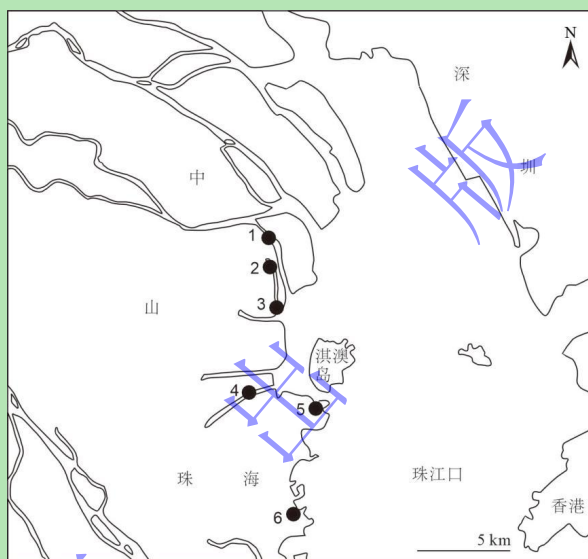


图2 沙蚕采样点分布图

Fig.2 Sampling distribution map of *Perinereis*

## 2.2 CT 扫描

对 PVC 管取心的样品进行 CT 扫描实验,以获得沙蚕潜穴的三维图像数据。CT 扫描仪器参数如下:型号是 Nanotom S,电压是 180 kV,功率是 15 W,细节检测能力高达 200 nm。CT 扫描过程在中国科学院南京土壤研究所完成。

## 2.3 三维重构

三维重构即对 CT 扫描获取的 CT 图像数据(体数据)进行三维可视化处理,包括体数据三维渲染、灰度值分割、定向数字虚拟切面、动画制作和图片的保存等。处理过程中使用到 ImageJ 和 VG Studio Max 3.0 两款软件。三维重构过程在中国科学院南京古生物地质研究所 X 射线断层扫描实验室完成。

具体处理方式如下:(1)将扫描获取的切片图导入至 ImageJ,观察生物潜穴是否清晰

可见, 将效果好的孔隙通过 ImageJ 进行提取, 效果不好的进行降位 (图片位深度由 16 bit 降至 8 bit)。(2) 将在 ImageJ 中处理过的图片导入 VG Studio 3.0 中再次处理, 最后对制作完成的生物潜穴进行渲染和动画的制作, 将图片和视频保存。

## 2.4 粒度分析

将采集的沉积物样品带回实验室, 在 105 °C 的烘箱内进行干燥。干燥后的沉积物按照不同的微环境装入样品袋内, 每袋样品 50 g 左右, 采用 Rise2008 激光粒度分析仪进行粒度分析。样品通过仪器的分选, 得到多个粒度曲线, 通过软件 PADMAS 颗粒粒度测量分析系统 (Particle Diameter Measure & Analysis System) 将测试数据做平均、统计、比较和模式转换等处理, 得到分析结果。

## 3 物理沉积特征

### 3.1 物理沉积构造特征

珠江三角洲现代沉积环境是指珠江水系 (西江、北江、东江等) 及其河口受水盆地, 至冲淡水所及的广大海域。上述河流所携泥沙由八大口门汇入, 它们在通流、潮流和其他海洋动力因素的共同影响下, 沉积作用甚为活跃。沉积物多以粉砂质黏粒结构、类块状构造为主<sup>[34]</sup>。在研究区发现了泥沙互层的平行层理, 其特点是连续性较好、纹层平直 (图 3a), 指示较强的水动力条件<sup>[35]</sup>。除此之外, 还发育在潮流和波浪作用下形成的波痕 (图 3b)。

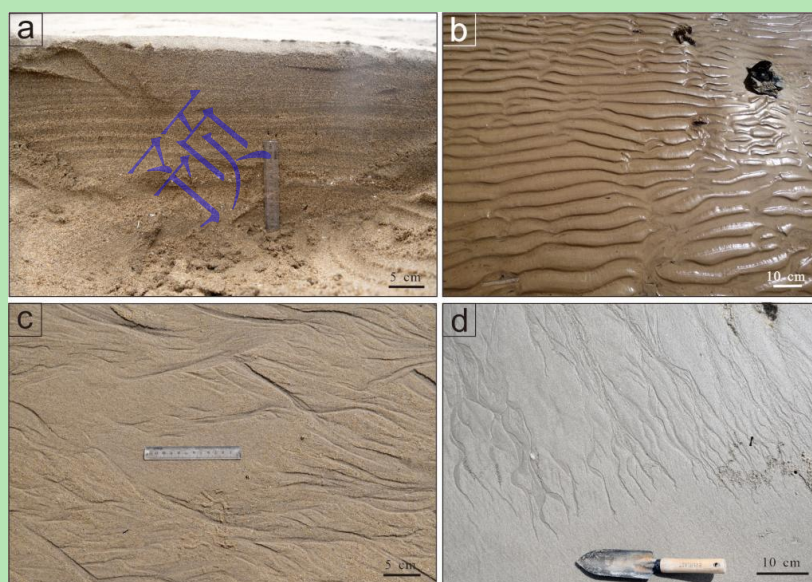


图 3 物理沉积构造特征

(a) 平行层理; (b) 削顶波痕; (c) 水流纹; (d) 水流纹

Fig.3 Physical sedimentary structure characteristics

(a) parallel bedding; (b) sharpening ripple marks; (c) current ripple; (d) current ripple

### 3.2 沉积物粒度特征

研究区内采样点分布主要分布于分流间海湾和下水道两种微环境（图4），1、2、3号点位为下水水道，4、5、6号点位为分流间海湾。各采样点多为粉砂，6号点位为中砂，分选性整体较差，水的盐度中等，多为半咸水，部分淡水和咸水，分流间海湾浑浊度较高，5号点位和6号点位浑浊度最高，下水水道浑浊度总体较低（表1）。总有机碳（TOC）是沉积物重要的组成成分，常用于指示土壤中有机质的含量<sup>[36]</sup>，这些有机质也是沙蚕的食物来源。

表1 珠江三角洲样品粒度、浑浊度、盐度及总有机碳（TOC）含量

Table 1 Particle size, turbidity, salinity, and total organic carbon (TOC) of samples collected in the Pearl River Delta

站点	粒度/mm	浑浊度 (NTU)	盐度/‰	总有机碳/%
1	0.02	44.47	0.28	1.42
2	0.04	42.88	0.47	1.38
3	0.01	117.63	3.97	0.6
4	0.01	68.42	2.2	2.72
5	0.02	240.27	2.17	0.67
6	0.31	142.07	18	-

#### 4 沙蚕遗迹特征

在潮坪的东部边界（3号点），沙蚕是唯一的扰动生物。在其他五个站点（1，2，4，5，6），沙蚕是优势物种，但不是唯一的扰动生物。为了量化珠江三角洲潮坪现代沙蚕遗迹的特征，在4个站点对沙蚕的潜穴进行了计数，其中扰动率为平均潜穴横截面积乘以平均潜穴密度乘以0.01（表2），沙蚕潜穴洞口的平均直径为0.13 cm。其中，2号点扰动率最大，为6.7%，其次为4号点为2.93%，1和5号点扰动率最低，不到0.5%。

表2 沙蚕扰动率统计

Table 2 Statistics on the disturbance rate of *Perinereis*

站点	平均潜穴直径 (cm)	平均潜穴横截面积 (cm <sup>2</sup> )	平均潜穴密度 (潜穴数/m <sup>2</sup> )	扰动率 (%)
1	0.116	0.042	300	0.126
2	0.164	0.085	7900	6.696
4	0.182	0.104	2800	2.926
5	0.055	0.010	4900	0.466

双齿围沙蚕 *Perinereis aibuhitensis* (Grube) 主要分布在分流间海湾和下水水道，幼虫以浮游生物为食，成虫以腐殖质为食<sup>[35]</sup>。沙蚕造的遗迹主要有觅食迹和居住迹。觅食迹的形态有直型和弯曲型，宽为1~2 mm，觅食迹两端一般与两个潜穴口相连，潜穴密度较高时，觅食迹交叉，沉积底质含水量较低的情况下，觅食迹很浅导致模糊不清<sup>[37]</sup>。居住迹主要是垂直管状的居住潜穴，潜穴口在层面上呈圆形（图4d），直径0.5~2 mm，觅食时沙蚕伸出

穴口，摄食层面上的藻类和有机碎屑，稍有动静立即钻入潜穴。层内有J型、Y型、U型的居住迹和觅食潜穴，穴道为圆形，内表面光滑，无衬壁。1号站点底质为泥沙混合，2号站点底质为略带砾石的砂质泥，3号站点底质为泥，4号站点底质为略带砾石的泥，5号站点底质为略带砾石的砂质泥，6号站点底质为沙。沙蚕向下掘开口向上的U形潜穴，潜穴周围有明显的颜色区分（图4b）。

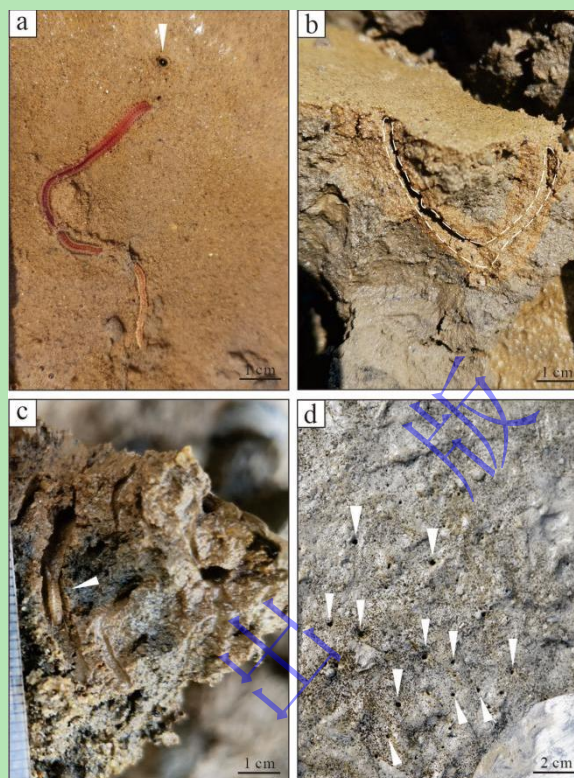


图4 沙蚕遗迹

(a) 1号点处层面上的双齿围沙蚕；(b) 1号点的U形潜穴截面；(c) 2号点处潜穴中的双齿围沙蚕；(d) 4号点的沙蚕潜穴

Fig.4 Neoichnology of *Perinereis*

(a) *Perinereis* on the surface at station 1; (b) U-shaped burrow profile at station 1; (c) *Perinereis* in a burrow at station 2; (d) burrow of *Perinereis* at station 4

通过CT扫描及三维重构双齿围沙蚕潜穴，可以清晰地观察到沙蚕潜穴层内的三维形态，有Y形和I形的简单潜穴（图5a, b, e），垂直于层面，开口向上，由简单的Y形和I形潜穴连接起来，连接处有较小鼓包，直径约为5 mm。也有交错密集的复杂潜穴，这种潜穴多垂直于层面，连接处偶有球状鼓包，直径约为1 cm，侧边多分支（图5c）。还有和螃蟹共生的潜穴，更为粗壮的螃蟹潜穴，呈Y形或I形，直径为1~4 cm，更细小的沙蚕潜穴围绕着螃蟹潜穴呈网状分布（图5d），猜测可能是此处水动力条件较强，沙蚕需要依附在更为坚固的螃蟹潜穴中生存，且螃蟹潜穴中有足够的有机质适合沙蚕生存<sup>[38]</sup>。

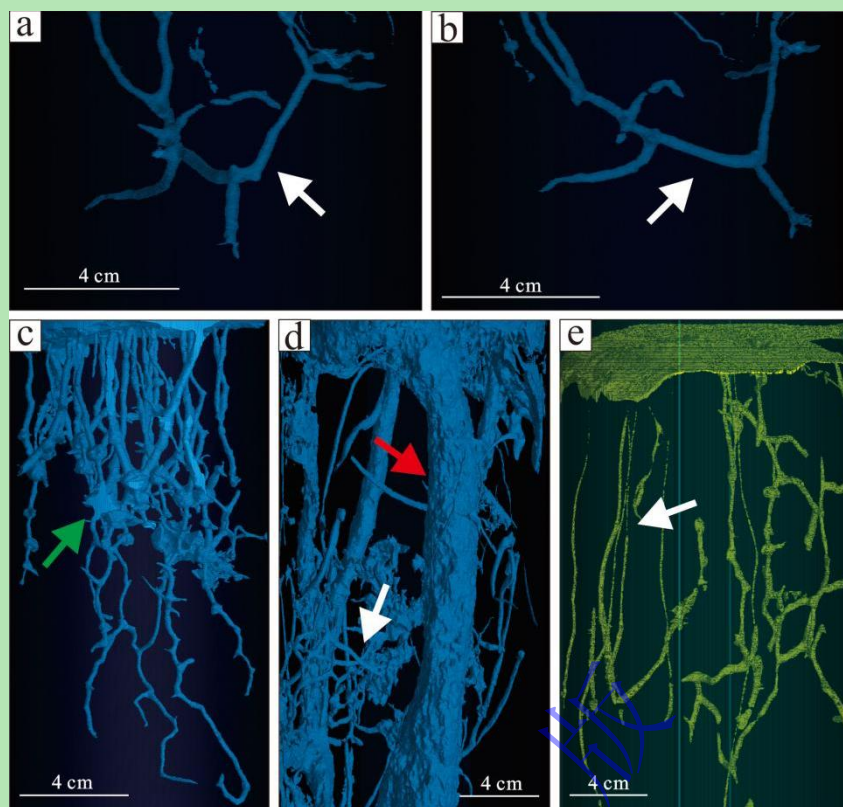


图 5 CT 扫描图像

(a) 1号点; (b) 1号点; (c) 2号点; (d) 4号点; (e) 5号点; 白色箭头指示沙蚕潜穴, 红色箭头指示螃蟹潜穴, 绿色箭头指示沙蚕潜穴连接处鼓包

Fig.5 Computed tomography (CT) scan image

(a) Scanning image of station 1; (b) Scanning image of station 1; (c) Scanning image of station 2; (d) Scanning image of station 4; (e) Scanning image of station 5; the white arrow indicates *Perinereis* burrow, the red arrow indicates a crab burrow, and the green arrow indicates bulges at the connection of *Perinereis* burrow

## 5 讨论

整体来看, 珠江三角洲潮坪沙蚕遗迹在空间分布上存在不均衡性及复杂性(图6)。对比数据分析可知, 沙蚕更喜欢生活在盐度较低、浑浊度较低、水动力条件较为低能、粒度较细、TOC 含量较高的区域。当盐度、浑浊度、粒度和 TOC 含量相差不多时, 水动力条件较弱的地方通常扰动率更高。沙蚕遗迹分布特征的精细差别与潮坪环境的物理化学条件具有良好的响应关系。主要的物理化学条件包括浑浊度、盐度、水动力特征、粒度、沉积速率及 TOC。

### 5.1 盐度、浑浊度与沙蚕遗迹分布的关系

沙蚕遗迹多出现在盐度较低的半咸水或淡水区域, 盐度为 0.5‰左右最适宜沙蚕生活, 浑浊度较低的地方沙蚕遗迹丰度较高, 浑浊度为 40~70 NTU 最适宜沙蚕生活。沙蚕遗迹的种类与水体的浑浊度、盐度都有密切的联系, 如高浑浊度的水阻碍了食悬浮物造迹生物的滤

食行为，堵塞造迹生物的虹吸管<sup>[39]</sup>；盐度是影响水生生物生存、生长的重要环境因子，水体的盐度影响其对渗透压的调节，进而影响其生理和生长<sup>[40]</sup>。双齿围沙蚕多分布在盐度较低的半咸水和淡水中，虽然双齿围沙蚕是耐盐生物，但盐度较高且水动力条件较为高能的地方沙蚕向下掘穴深度较浅，且潜穴无衬壁，不够坚固，不适合沙蚕生活。

## 5.2 水动力、粒度、TOC 与沙蚕遗迹分布的关系

沙蚕遗迹多出现在水动力条件较为低能、粒度较细、TOC 含量较高的站点。水动力、粒度及沉积速率三者之间是相互联系的，水动力条件和粒度对沉积速率起到了关键的控制作用<sup>[5]</sup>，而 TOC 又与粒度特征呈正相关，四者共同影响了生物的分布特征。水动力主要来自波浪和潮汐，珠江三角洲是波浪和潮汐共同控制的复合三角洲。沙蚕多生活在粒度较细的中粗粉砂和极细粉砂中，分选较差。沉积物粒度影响沙蚕进食，粒度太粗沙蚕不易进食或容易在沙蚕摄食时堵塞虹吸管<sup>[39]</sup>。沙蚕进食沉积底层的有机质，TOC 数据可以反映沉积底层的有机质含量，直观地表达沙蚕食物的丰度，3 和 5 号站点 TOC 含量较低（低于 0.7%），1、2、4 号站点 TOC 含量较高（图 7），高于 1.3%，食物来源丰富。大部分沙蚕都与螃蟹共生，这是因为螃蟹潜穴更加坚固，能够让沙蚕在水动力条件较高的地区生存下来，且螃蟹潜穴中有充足的食物来源供给沙蚕生活<sup>[38]</sup>。

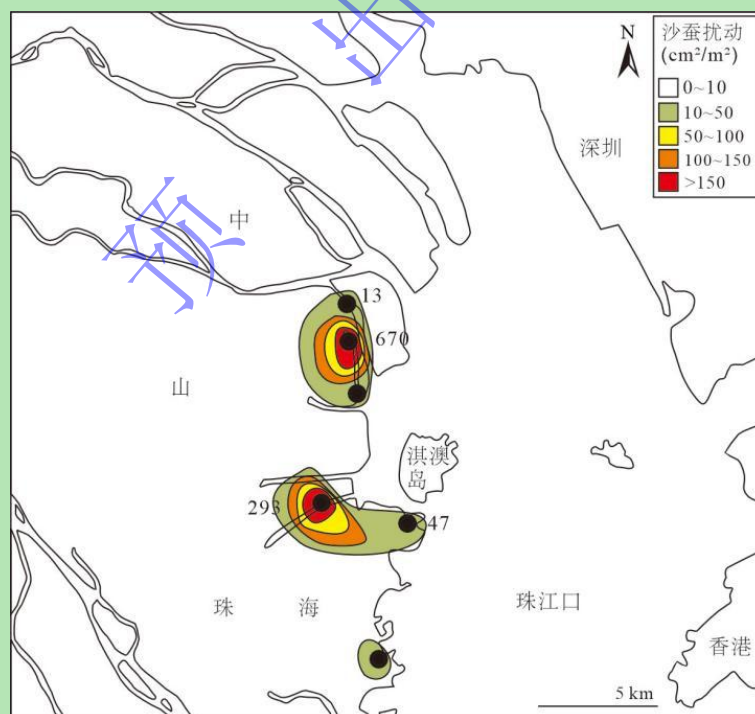


图 6 沙蚕扰动分布

Fig.6 Distribution of *Perinereis* disturbance



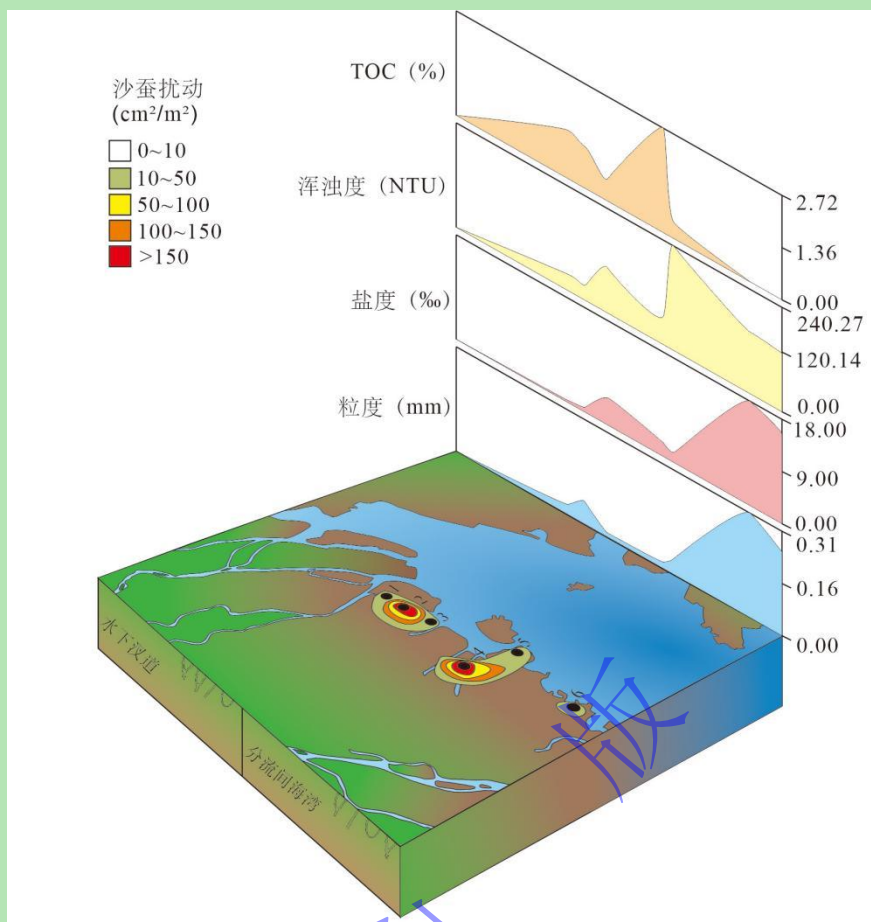


图7 珠江三角洲潮坪环境现代沙蚕遗迹影响因素模式图

Fig.7 Influence factor mode of the *Perinereis neoichnology* assemblage in a tidal flat of the Pearl River Delta

### 5.3 遗迹化石类比分析

研究区内沙蚕居住迹与遗迹化石 *Polykladichnus* 相似, *Polykladichnus* 是一种垂直或倾斜的圆柱形洞穴, 其特征是向上指向的 Y 形或 U 形分支, 连接到层面<sup>[41-42]</sup>。该遗迹化石是无衬壁的, 垂直或微倾斜, 笔直或轻微弯曲, Y 形和 U 形, 向上开口的圆柱形结构, 在连接处略有扩大鼓包, 单个潜穴的直径为 1~2 mm, 整个结构的长度可达 70 mm。潜穴充填的沉积底质通常比原本的沉积底质粒度更细, 潜穴保存得很完整<sup>[39]</sup>。*Polykladichnus* 通常属于 *Mermia* 遗迹相和 *Glossifunites* 遗迹相, *Mermia* 遗迹相可以代表湖泊完全水下沉积物中的遗迹特征<sup>[43]</sup>, *Glossifunites* 遗迹相可以代表受潮汐影响的分流河道<sup>[44]</sup>, 含有 *Polykladichnus* 的遗迹化石组合主要出现在潮间带和潮道区域<sup>[11,20,44-45]</sup>。

## 6 结论

(1) 通过对珠江三角洲潮坪沙蚕遗迹进行详细描述, 沙蚕主要分布在水下汉道和分流间海湾两种微环境中。沙蚕遗迹与环境之间的关系存在其复杂性, 珠江三角洲潮坪沙蚕遗迹

的丰度所受到的环境压力环境压力主要来自盐度、沉积速率、水浊度、水动力、粒度和 TOC。研究表明,沙蚕遗迹在水动力条件较为低能、盐度较低、浑浊度较低、总有机碳含量丰富的分流间湾潮坪或水下河道中丰度更高。

(2) 沙蚕居住迹在层面上呈圆形开口,直径在 0.6~1.8 mm 之间,层内多呈开口向上的 Y 形、U 形和 I 形的居住潜穴。取心样品的 CT 成像揭示了它们的 Y 形和 I 形形态,沿潜穴痕迹剖开的截面显示了 U 形形态,这与痕迹化石 *Polykladichus* 的形态非常相似。因此,可能在相同的环境条件下,双齿围沙蚕可以被认为是 *Polykladichus* 的造迹生物之一。

(3) 通过研究珠江三角洲沙蚕遗迹发现,沙蚕更喜爱在分流间湾的潮坪区域和水下河道掘穴生活,这与沉积环境和物化条件之间存在复杂的联系。将研究区内沙蚕居住迹与 *Polykladichus* 对比分析,含 *Polykladichus* 的遗迹化石组合主要出现在潮间带和潮道区域,补充了现代沙蚕遗迹的生物学资料,可以为相似的遗迹化石的形貌学研究及埋藏学研究提供现代遗迹学资料,也可以为遗迹相的分析以及沉积环境的划分提供现代遗迹学的参考资料,为古环境的重建提供实证。

致 谢 感谢中国科学院南京土壤研究所各位老师对本文遗迹标本的 X 射线计算机断层成像提供的帮助,中国科学院南京地质古生物研究所各位老师对三维重构提供的帮助,感谢审稿人以及编辑给本文提供诸多宝贵的修改意见及启发性的建议!

#### 参考文献 (References)

- [1] 吴贤涛. 痕迹学入门[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986: 1-11. [Wu Xiantao. The basic of ichnology[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1986: 1-11.]
- [2] 胡斌,王冠忠,齐永安. 痕迹学理论与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社,1997: 41-50. [Hu Bin, Wang Guanzhong, Qi Yongan. Theory and application of ichnology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1997: 41-50.]
- [3] 王海邻, 张彬, 宋慧波, 等. 滦河三角洲潮坪环境现代生物遗迹组合及其分布特征[J]. 古地理学报, 2022, 24(6): 1179-1192. [Wang Hailin, Zhang Bin, Song Huibo, et al. Assemblages of lebensspuren and distribution characteristics in tidal flat of Luanhe delta[J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24(6): 1179-1192.]
- [4] Dashtgard S E. Neoichnology of the Lower delta plain: Fraser River Delta, British Columbia, Canada: Implications for the ichnology of deltas[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 307(1/2/3/4): 98-108.
- [5] Ayranci K, Dashtgard S E. Infaunal holothurian distributions and their traces in the Fraser River delta front and prodelta, British Columbia, Canada[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 392: 232-246.
- [6] Ayranci K, Dashtgard S E, MacEachern J A. A quantitative assessment of the neoichnology and biology of a delta front and prodelta, and implications for delta ichnology[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 409: 114-134.
- [7] Ayranci K, Dashtgard S E. Asymmetrical deltas below wave base: Insights from the Fraser River Delta, Canada[J]. Sedimentology, 2016, 63(3): 761-779.
- [8] 张白梅. 滦河三角洲现代生物遗迹的组成与分布特征[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014: 34-37. [Zhang Baimei. The biogenic sedimentary structures of the Luanhe River Delta and their composition and distribution characters[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014: 34-37.]

- [9] Kulkarni K G, Panchang R. New insights into polychaete traces and fecal pellets: another complex ichnotaxon[J]? Public Library of Science ONE, 2015, DOI:10.1371/journal.pone.0139933.
- [10] Wang Y Y, Wang X Q, Uchman A, et al. Burrows of the polychaete *Perinereis aibuhitensis* on a tidal flat of the Yellow River Delta in China: Implications for the ichnofossils *Polykladichnus* and *Archaeonassa*[J]. *Palaios*, 2019, 34(5): 271-279.
- [11] Wang Y Y, Wang X Q, Hu B, et al. Tomographic reconstructions of crab burrows from deltaic tidal flat: Contribution to palaeoecology of decapod trace fossils in coastal settings[J]. *Palaeoworld*, 2019, 28(4): 514-524.
- [12] 王翠, 王媛媛, 胡斌. 黄河三角洲潮坪环境现代生物遗迹与物化条件的响应关系[J]. *沉积学报*, 2023, 41(3): 748-762. [Wang Cui, Wang Yuanyuan, Hu Bin. The response relationship between biogenic structures and physicochemical stresses of the Yellow River Deltaic tidal flat[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(3): 748-762.]
- [13] 王媛媛, 勾松林, 张国成. 现代珠江三角洲前缘生物遗迹组成与分布特征[J/OL]. *沉积学报*, 1-23[2024-05-17]. [Wang Yuanyuan, Gou Songlin, Zhang Guocheng. Composition and distribution characteristics of biological traces in the Pearl River Delta front[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1-23[2024-05-17].]
- [14] Dashtgard S E. Linking invertebrate burrow distributions (neoichnology) to physicochemical stresses on a sandy tidal flat: Implications for the rock record[J]. *Sedimentology*, 2011, 58(6): 1303-1325.
- [15] 胡斌, 张白梅, 王海邻, 等. 现代滦河三角洲沉积中的生物遗迹[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 34(2): 185-191. [Hu Bin, Zhang Baimei, Wang Hailin, et al. Neoichnology in modern Luanhe Delta deposits[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2015, 34(2): 185-191.]
- [16] 王海邻. 我国东部沿海潮坪沉积中的现代生物遗迹研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018: 49-52. [Wang Hailin. Studies about the modern biogenic traces in the tidal flat deposits along the coastal zones of eastern China[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018: 49-52.]
- [17] Paz D M, Richiano S, Varela A N, et al. Ichnological signatures from wave- and fluvial-dominated deltas: The La Anita Formation, Upper Cretaceous, Austral-Magallanes Basin, Patagonia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104168.
- [18] MacEachern J A, Bann K L, Pemberton S G, et al. The ichnofacies paradigm: High resolution paleoenvironmental interpretation of the rock record[J]. *SEPM Short Course Notes*, 2007, 52: 27-64.
- [19] Singh M C, Kundal P, Kushwaha R A S, et al. Ichnology of Bhuban and Boka bil Formations, Oligocene-Miocene deposits of Manipur western hill, northeast India[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2010, 76(6): 573-586.
- [20] Virtasalo J J, Bonsdorff E, Moros M, et al. Ichnological trends along an open-water transect across a large marginal-marine epicontinental Basin, the modern Baltic Sea[J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 241(1/2/3/4): 40-51.
- [21] Tiwari R P, Rajkonwar C, Lalchawimawii, et al. Trace fossils from Bhuban Formation, Surma group (Lower to Middle Miocene) of Mizoram India and their palaeoenvironmental significance[J]. *Journal of Earth System Science*, 2011, 120(6): 1127-1143.
- [22] Crippa G, Baucon A, Felletti F, et al. A multidisciplinary study of ecosystem evolution through early Pleistocene climate change from the marine Arda River section, Italy[J]. *Quaternary Research*, 2018, 89(2): 533-562.
- [23] Morelle C, Denayer J. First description of the ichnofauna from the type locality of the Famennian stage (Late Devonian) of S Belgium[J]. *Ichnos*, 2020, 27(4): 384-405.
- [24] Ali S, Wilson B. Ichnology of the Pliocene Casa Cruz member (Moruga Formation), Trinidad, West Indies: Delineating depositional environments and environmental stresses[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, 112: 103584.
- [25] Rodríguez-Tovar F J, van Dijk G, Maars J, et al. Ichnological analysis of the Messinian-Zanclean (Miocene-Pliocene) transition at Eraclea Minoa (Sicily): Tracemaker response to the Terminal Messinian flood[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2023, 619: 111539.
- [26] Biranvand B, Sharafi M, Fursich F T, et al. Taphonomic analysis of shell concentrations in deltaic Miocene deposits of the South Caspian Basin, eastern Paratethys[J]. *Historical Biology*, 2023, 1-17. (doi: 10.1080/08912963.2023.2261981)
- [27] 周瑛, 刘洁, 吴仁海. 珠江三角洲水环境问题及其原因分析[J]. *云南地理环境研究*, 2003, 15(4): 47-53. [Zhou Ying, Liu Jie, Wu Renhai. Analysis on water environmental problems and their causes in Pearl River Delta[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2003, 15(4): 47-53.]

- [28] 胡海英, 黄国如. 珠江三角洲潮位时间序列的混沌特性分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(6): 21-23. [Hu Haiying, Huang Guoru. Analysis of chaotic characteristics of tide level series in Pearl River Delta[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(6): 21-23.]
- [29] 赵焕庭. 珠江河口的水文和泥沙特征[J]. 热带地理, 1989, 9(3): 201-212. [Zhao Huanting. Hydrological and sedimentary characteristics of the Pearl River estuary[J]. Tropical Geography, 1989, 9(3): 201-212.]
- [30] 王珊珊. 珠江三角洲和近岸河口海域现代沉积环境及晚更新世以来的环境演变[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 11-13. [Wang Shanshan. Present sedimentary environments and environment evolvement since Late Pleistocene for the Pearl River Delta and Intracoastal estuary and sea area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008: 11-13.]
- [31] 钟子悦, 余明辉, 陈小齐, 等. 珠江三角洲河网地形和径流条件变化对潮动力格局的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 213-221. [Zhong Ziyue, Yu Minghui, Chen Xiaoqi, et al. Effects of changes in river network topography and runoff on tidal dynamic pattern in Pearl River Delta[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 213-221.]
- [32] Zhang Q, Chen Y D, Jiang T, et al. Human-induced regulations of river channels and implications for hydrological alterations in the Pearl River Delta, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25(7): 1001-1011.
- [33] Zhang Q, Xu C Y, Chen X H, et al. Abrupt changes in the discharge and sediment load of the Pearl River, China[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(10): 1495-1508.
- [34] 周青伟, 马道修, 徐明广, 等. X射线照像在珠江三角洲现代沉积环境调查中的应用及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987(3): 79-89. [Zhou Qingwei, Ma Daoxiu, Xu Mingguang, et al. Application of X-ray radiography in modern sedimentary environmental investigations in the Zhujiang river delta and its significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987(3): 79-89.]
- [35] 郑伟, 孙长彦, 白万备, 等. 洛阳龙门地区寒武系第三统张夏组碳酸盐岩风暴沉积类型及遗迹化石特征[J]. 地质科技情报, 2015, 34(6): 92-99. [Zheng Wei, Sun Changyan, Bai Wanbei, et al. Types of storm deposit sequence of carbonates and characteristics of trace fossils in Zhangxia formation of 3<sup>rd</sup> epoch of carbonates in Longmen, Luoyang region[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(6): 92-99.]
- [36] 韩万兵. 总有机碳分析仪测定土壤中的有机碳[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(9): 72-74. [Han Wanbing. Determination of organic carbon in soil by total organic carbon analyzer[J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(9): 72-74.]
- [37] 王媛媛, 王学芹, 胡斌. 黄河三角洲潮坪环境中现代生物遗迹组成与分布特征[J]. 沉积学报, 2019, 37(6): 1244-1257. [Wang Yuanyuan, Wang Xueqin, Hu Bin. The composition and distribution characteristics of biogenic sedimentary structures in tidal flat of Yellow River Delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(6): 1244-1257.]
- [38] Patel S J, Desai B G. Animal-sediment relationship of the crustaceans and polychaetes in the intertidal zone around Mandvi, Gulf of Kachchh, western India[J]. Journal of the Geological Society of India, 2009, 74(2): 233-259.
- [39] van Wagoner J C, Bertram G T. Sequence stratigraphy of foreland Basin deposits: Outcrop and subsurface examples from the Cretaceous of North America[M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1995: 487.
- [40] 蔡东亿, 阎希柱. 盐度对双齿围沙蚕耗氧率和排氨率的影响[J]. 海洋科学, 2014, 38(5): 54-59. [Cai Dongyi, Yan Xizhu. Effects of salinity on oxygen consumption rate and ammonia-N excretion rate of *Perinereis aibuhitensis*[J]. Marine Sciences, 2014, 38(5): 54-59.]
- [41] Schlirf M, Uchman A. Revision of the ichnogenus *Sabellarifex* Richter, 1921 and its relationship to *Skolithos* Haldeman, 1840 and *Polykladichnus* Fürsich, 1981[J]. Journal of Systematic Palaeontology, 2005, 3(2): 115-131.
- [42] Mork A, Bromley R G. Ichnology of a marine regressive systems tract: The Middle Triassic of Svalbard[J]. Polar Research, 2008, 27(3): 339-359.
- [43] Pickerill R K. Carboniferous nonmarine invertebrate ichnocoenoses from southern new Brunswick, eastern Canada[J]. Ichnos, 1992, 2(1): 21-35.
- [44] Wood J D, Bodin S, Redfern J, et al. Controls on facies evolution in low accommodation, continental-scale fluvio-paralic systems (Messak Fm, SW Libya)[J]. Sedimentary Geology, 2014, 303: 49-69.
- [45] Pieńkowski G, Uchman A, Ninard K, et al. Ichnology, sedimentology, and orbital cycles in the hemipelagic Early Jurassic Laurasian Seaway (Pliensbachian, Cardigan Bay Basin, UK)[J]. Global and Planetary Change, 2021, 207: 103648.

# Composition and Distribution Characteristics of *Perinereis* Trace Fossils in a Tidal Flat of the Pearl River Delta and Their Indicative Role in the Sedimentary Environment

WANG YuanYuan<sup>1,2</sup>, YANG ManZhi<sup>1</sup>, ZHANG GuoCheng<sup>1,2</sup>

1. Institute of Resource and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

2. Henan Key Laboratory of Biogenic Traces & Sedimentary Minerals of Henan Province, Jiaozuo, Henan 454003, China

**Abstract:** [Objective] The sedimentary environment of the Pearl River Delta is complex with abundant *Perinereis* trace fossils. The characteristics, distribution, and assemblage of *Perinereis* and their relationships with sedimentary environment and sediment properties are significant for the study of trace fossils and the palaeoenvironment. [Methods] Based on sedimentary and ichnological methods, grain size analysis, salinity, turbidity, total organic carbon (TOC), X-ray scans, and three-dimensional (3D) reconstruction were applied to the modern biogenic sedimentary structures in different microenvironments of the Pearl River Delta tidal flat, discussed the composition, assemblage, and distribution characteristics of *Perinereis* in a tidal flat of the Pearl River Delta, and analyzed the relationship between the biological assemblage and the sedimentary environments. [Results] (1) The *Perinereis* mainly lives in the tidal flat area of the tidal channel and the interdistributary bay in the Pearl River Delta. (2) The remains of the *Perinereis* mainly have grazing trails and dwelling trails. However, the grazing trails on the layer are difficult to observe, the dwelling trails in the layer mainly have simple Y-, I-, and U-shaped and complex network structures, and there are bulges at the joints. (3) The *Perinereis* is suitable for living in the tidal flat or channel of the interdistributary bay with low hydrodynamic conditions, low salinity, low turbidity, and rich total organic carbon content. [Conclusions] The spatial distribution of *Perinereis* neoichnology is imbalanced, and multiple environmental conditions jointly control the abundance of *Perinereis* neoichnology. The habitat of *Perinereis* is similar to the trace fossil *Polykladichnus*, which can belong to both the *Mermia* and *Glossifunites* ichnofacies; the trace fossil assemblage of this relic mainly appears in the channel and tidal flat area, and this study supplements the biological data for the modern neoichnology of *Perinereis*.

**Key words:** Pearl River Delta; tidal flat; neoichnology of *Perinereis*; sedimentary environment