



下珠江三角洲平原生物遗迹特征及对古环境的指示

王媛媛, 张亚斌, 王晓波, 张国成

Characteristics of the biogenic traces in the Lower Pearl River Delta Plain and their implication to paleoenvironment

WANG Yuanyuan, ZHANG Yabin, WANG Xiaobo, and ZHANG Guocheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024082901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江三角洲晚第四纪沉积序列及其对海侵过程的响应

Sedimentary sequences in response to marine transgression during the late Quaternary, Pearl River delta

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 18-30

珠江三角洲全新世海-陆沉积模式转换及其年代

Holocene sedimentary environment transform and onset time of Pearl River Delta progradation

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 107-117

珠江三角洲第四纪沉积物初始沉积年龄及沉积演化

Discussion on the Quaternary initial sedimentary age and sedimentary evolution in the Pearl River Delta

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 145-156

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77-89

河流三角洲沉积体系再析

Revisiting the concept of river delta sedimentary systems

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 1-13

台风“杜苏芮”远端影响下黄河三角洲沉积特征变化

Variations in sedimentation characteristics of the Yellow River Delta under the remote influence of Typhoon Doksuri

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(5): 50-57



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王媛媛, 张亚斌, 王晓波, 等. 下珠江三角洲平原生物遗迹特征及对古环境的指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(3): 13-25.

WANG Yuanyuan, ZHANG Yabin, WANG Xiaobo, et al. Characteristics of the biogenic traces in the Lower Pearl River Delta Plain and their implication to paleoenvironment[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(3): 13-25.

下珠江三角洲平原生物遗迹特征及对古环境的指示

王媛媛^{1,2}, 张亚斌¹, 王晓波¹, 张国成^{1,2}

1. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003

2. 河南省生物遗迹与成矿过程国际联合实验室, 焦作 454003

摘要: 下珠江三角洲平原受河流和海洋共同影响, 生物种类繁多且对环境响应灵敏, 在一定程度上反映了沉积环境特征。通过使用三维重构技术, 对研究区内不同微环境中的生物遗迹组成进行了精细研究, 对沉积环境中的盐度、粒度、浑浊度、TOC 等因素进行了分析。结果如下: ① 研究区内造迹生物有甲壳类动物螃蟹、环节动物沙蚕、双壳类动物河蚌、弹涂鱼以及鸟类等, 其中甲壳类螃蟹和环节动物沙蚕为主要造迹生物。② 研究区内主要生物遗迹有双壳类动物河蚌的进食迹、居住迹, 甲壳类动物螃蟹的居住迹和爬行迹, 环节动物沙蚕的居住迹, 弹涂鱼的居住迹和爬行迹等, 垂向潜穴主要呈 I 型、L 型、Y 型和 U 型。③ 研究区内潜穴形态与 *Arenicolites*、*Cylindrichnus*、*Diplocraterion*、*Ophiomorpha*、*Palaeophycus*、*Skolithos* 等遗迹化石进行了类比分析, 并与 *Skolithos* 遗迹相存在相似之处。研究了下珠江三角洲平原生物遗迹组成及分布特征, 绘制了生物及遗迹分布图, 确定了下珠江三角洲平原的遗迹学特征, 为三角洲古遗迹学和古沉积环境提供了现代实证。

关键词: 遗迹学; 沉积环境; 下三角洲平原; 珠江三角洲

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024082901

Characteristics of the biogenic traces in the Lower Pearl River Delta Plain and their implication to paleoenvironment

WANG Yuanyuan^{1,2}, ZHANG Yabin¹, WANG Xiaobo¹, ZHANG Guocheng^{1,2}

1. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

2. Henan International Joint Laboratory of Biogenic Traces and Sedimentary Minerals, Jiaozuo 454003, China

Abstract: Affected by both rivers and oceans, the Lower Pearl River Delta Plain has a wide variety of organisms and is sensitive to the environment, which reflects the characteristics of the sedimentary environment to some certain extent. By using three-dimensional reconstruction technology, the composition of biological traces in different microenvironments was studied in detail. The physico-chemical factors such as salinity, particle size, turbidity, and TOC in the biogenic traces were analyzed in the study area. Results are as follows. (1) The tracemakers in the study area included crustacean crabs, annelid *Perinereis*, bivalve river clams *Corbicula fluminea*, mudskippers *Periophthalmus*, and birds. Among them, the crabs and *Perinereis* were the main tracemakers. (2) The main biological traces in the study area included feeding and dwelling traces of *Perinereis*, dwelling and crawling traces of crabs, dwelling traces of *Corbicula fluminea*, dwelling and crawling traces of *Periophthalmus*, etc. The vertical burrows are mainly in I-, L-, Y- and U-shapes. (3) The burrow morphology in the study area was compared with the ichnofossils of *Arenicolites*, *Cylindrichnus*, *Diplocraterion*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, and *Skolithos*. They are analog with *Skolithos* ichnofacies. Meanwhile, the composition and distribution of the biogenic traces in the study areas were studied, and the distribution maps were analyzed. This study provided modern evidence for the sedimentological study in the Lower Pearl River Delta and implication to the identification of the ichnology and paleoenvironment in the ancient lower delta plain.

Key words: ichnology; sedimentary environment; the lower delta plain; the Pearl River Delta

三角洲是一种常见且重要的沉积相, 是油气聚集的有利场所, 准确可靠的三角洲沉积模式, 对指

导油气的勘探和开发有重要意义^[1]。遗迹学是研究现代和古代生物遗迹的一门学科^[2], 生物遗迹与其

资助项目: 国家自然科学基金“珠江三角洲现代生物遗迹对三角洲沉积过程中环境因素的响应研究”(42172130); 河南省本科高校青年骨干教师培养计划(2023GGJS055)

作者简介: 王媛媛(1984—), 女, 博士, 副教授, 主要从事遗迹学和沉积学研究, E-mail: yyw@hpu.edu.cn

收稿日期: 2024-08-29; 改回日期: 2024-11-18. 文凤英编辑

所在沉积环境有着密切的联系,在解释沉积环境方面有重要意义^[3-4]。现代遗迹研究可以确定造迹生物和沉积学变量^[5],能够提供帮助解释古环境的重要现代信息。

国外对三角洲的现代生物遗迹研究较多,如Shahin等对弗雷泽河下三角洲平原、前缘以及边界海湾的生物遗迹进行了研究,将潜穴分布与物化参数联系起来并绘制了生物遗迹分布图^[6-8];Zaki研究了尼罗河三角洲潮间带的海洋生物遗迹组合,提出尼罗河三角洲海岸沉积学-现代遗迹学模式^[9];Chirananda对恒河三角洲下游地区的现代生物遗迹进行了研究,揭示了普通底栖无脊椎动物的生存环境的性质和环境分带,并用于解释类似的遗迹化石和古海岸环境^[10]。国内大部分学者对珠江三角洲的研究包括其形成演化^[11-14]、古地理重建^[15-18]、油气^[19-21]、水文特征^[22-23]、化学元素特征^[24]等方面,也有少数学者对珠江三角洲凹陷盆地的遗迹相和边缘三角洲的生物遗迹^[25-26]进行了研究,但是对下珠江三角洲平原地区的现代生物遗迹研究较少,主要对滦河三角洲潮坪^[27]、黄河三角洲潮坪^[28-32]、杭州湾^[33]以及珠江三角洲前缘^[34]生物遗迹的组成和分布特征进行了研究,但对三角洲现代生物遗迹的研究广度和深度不够。

珠江三角洲受控因素复杂,生物种类繁多,尤其是三角洲平原一带。因此,本工作主要研究下珠江三角洲平原现代生物遗迹的组成及分布特征,并与相似遗迹化石进行对比分析,旨在为古三角洲的恢复与重建提供更多现实依据。

1 区域概况

珠江流域主要由西江、北江和东江三大水系组成,是珠江三角洲的主要建成者^[35]。珠江三角洲是由许多小三角洲组合而成的,包括西江三角洲、北江三角洲和东江三角洲,是一个复合型三角洲,水动力主要由潮汐和波浪控制,也有少数河流控制^[34-36]。本区属于不规则混合半日潮,潮差较小,平均潮差为0.86~1.57 m,最大潮差为2.29~3.36 m,磨刀门水道潮差最小,珠江三角洲属弱潮汐河口^[34-35, 37-39]。

珠江三角洲平原地区大致范围为21°52′~23°55′N、111°30′~115°50′E(图1),其中中部平原(番禺平原、顺德平原和大鳌子平原)是珠江三角洲的主要构成部分^[40-41]。研究区属于下珠江三角洲平原亚相,包括分流河道、洪泛平原和潮坪等多个微

相,其大致范围为22°00′~22°24′N、113°03′~113°27′E(图1),由河流和海洋共同作用^[6, 42-44],本次研究共选取45个采样点。

2 研究方法

本次研究所用到的方法有粒度分析、TOC分析、浑浊度与盐度测试、CT扫描、三维重构,其中粒度分析和浑浊度与盐度测试是为了获取生物所在沉积环境的相关数据,以便更好地分析生物与沉积环境的关系;CT扫描和三维重构是为了将所取样品进行处理,以便更好地观察生物潜穴特征。

2.1 取样

以下珠江三角洲平原为研究区,在每个采样点进行经纬度标记,对采样点内的生物及其遗迹进行拍照测量,并取得每个点位内的水样一份和沉积物两份。对于易采集且不易破坏的生物潜穴,用长15 cm、宽7.5 cm的PVC管进行取芯。取样完毕后,将未固结或含水量较多的沉积物进行自然风干,并记录表格。

2.2 粒度分析

粒度分析主要是对研究区内采集的沉积物样品进行分析,主要步骤如下:①将风干的样品称取0.2 g左右放入洗净的烧杯中,加入15 mL 10%的双氧水,加热至100 ℃,保持2 h去除有机质;②静置10 min后,加入10 mL 10%的盐酸去除碳酸盐,静置48 h后待测。粒度测试使用Marvern Mastersizer 2000型粒度仪,测量范围为0.02~2 000 μm,重复检测相对误差小于1%。

2.3 TOC分析

①称重:称取0.1 g左右待测沉积物样品,将样品倒入消解管底部。②消解:使用移液枪吸取2.5 mL 0.27 mol/L的重铬酸钾和3.5 mL 1.84 g/mL的浓硫酸加入消解管,摇匀后盖上盖子。消解仪开机,预热至100 ℃后将消解管放至消解仪进行消解,消解温度设置为135 ℃,消解30 min。③离心:消解管冷却至室温后加入去离子水,定容至25 mL。摇晃均匀后将溶液倒至离心管中,使用离心机进行离心。④测吸光度:吸取离心管中上清液至比色皿进行比色并读取数值。

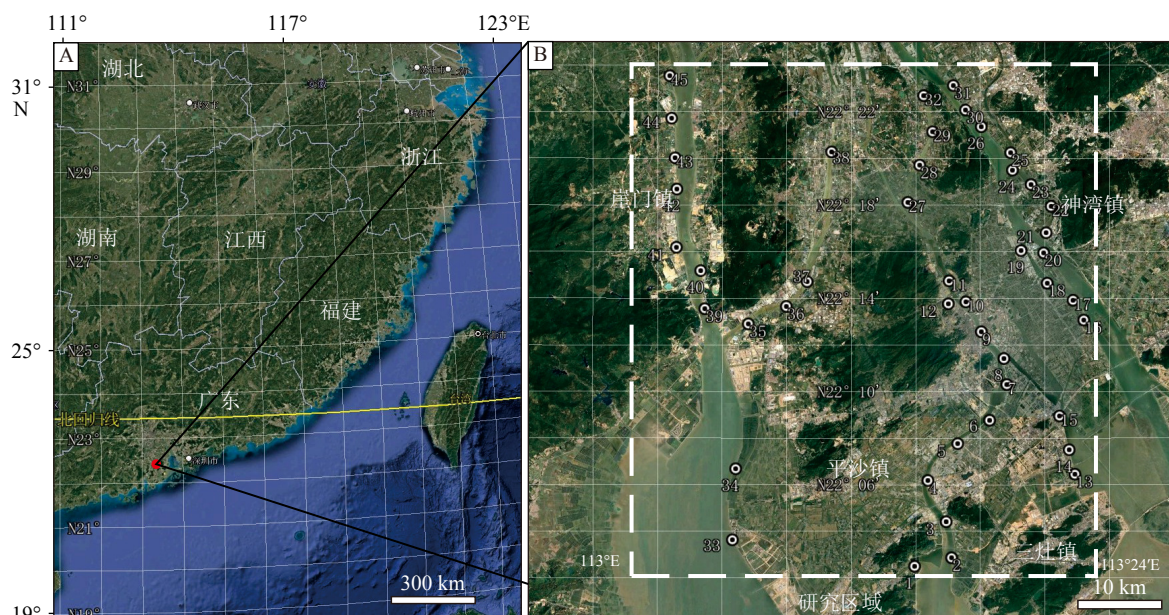


图 1 研究区位置图

A: 研究位置图, B: 研究区域及采样点(白色圆圈表示采样点)。

Fig.1 Location of the study area

A. The regional position of the study area, B. the area of study and the sampling points
(white circles represent the sampling points).

2.4 浑浊度测试

使用 NS 型浊度计, 测试步骤: ① 开机预热 30 min 后, 选择适当的量程; ② 缓慢注入约 20 mL 水样后, 将样杯平稳置入比色池, 盖上比色池内盖, 关闭比色池外盖; ③ 待显示数据稳定后, 即可读取被测溶液的浊度值, 单位为 NTU。

2.5 盐度测试

盐度测定使用的是精度较高的电导率法。操作步骤如下: ① 将电导率仪平稳地放在桌面上, 接入电源并插入电极; ② 校准仪器后将可调电极浸入待测溶液; ③ 读取测试结果并记录, 测试 3 次后取均值。使用仪器参数如下: 仪器名称 SX813, 测试精度 $\pm 1\%$, 分辨率 0.01, 盐度单位用 ‰ 表示。

2.6 CT 扫描及三维重构

CT 扫描实验在中国科学院南京土壤研究所进行, 仪器参数如下: 仪器名称 Nanotom S, 电压 180 kV, 功率 15 W, 细节检测能力高达 200 nm。主要步骤如下: ① 断层扫描: 由 X 射线源发射出 X 线束, 对检测对象的特定体层的不同方向进行扫描, 获得整个样品的二维投影数据。② 计算机处理: 将得到的数据导入 Image J 中转化为二维切面数据。

三维重构过程在中国科学院南京地质古生物研究所进行, 使用 VG Studio MAX 软件对 CT 扫描的数据进行处理, 恢复样品内部生物潜穴的 3D 形态。重构的三维立体图像进行后期分析和处理, 主要包括体数据的分割、合并、镜像、光滑、渲染和动画等。

3 沉积特征

研究区可划分为主河道、分流河道、废弃河道、天然堤和潮坪 5 个现代沉积微环境。点位 26、33—34、39、41—44 所在微环境为主河道; 点位 3—10、12、15、18、21、23、25、27—29、31—32、35—38 所在微环境为分流河道; 点位 19 所在微环境为废弃河道; 点位 11、16、40、45 所在微环境为天然堤; 点位 1—2、13—14、17、20、22、24、30 所在微环境为潮坪。

3.1 物理沉积构造

层理是水流作用于一定的沉积物所产生的某种几何形态的沉积单位^[45], 对解释古水流、沉积物类型以及沉积环境演变具有重要参考价值^[46]。珠江三角洲平原发育的层理类型有平行层理、交错层理、递变层理等^[38], 研究区内发育的层理类型主要

是砂泥交叠所产生的水平层理。波痕也是珠江三角洲常见的一种沉积构造,研究区内发育的波痕类型主要为浪成波痕和流水波痕。除层理和波痕外,研究区内还发育有泥裂和河流冲刷构造。

3.2 物化参数特征

采样点的沉积物根据海洋调查规范 (GB/T 12763.8-2007) 采用的等比制粒级划分可划分为粉砂、细砂和中砂 3 个等级 (图 2 A), 具体粒度分布特征如下: 点位 3、13、14、33 为中砂, 点位 4 和点位 6 为细砂, 点位 8 既有粉砂也有细砂, 点位 20 和点位 23 既有粉砂也有中砂, 其余点位均为粉砂。粒

度由北向南整体呈递增趋势。

研究区内总有机碳含量 (TOC) 大多在 1%~3% 之间 (图 2 B), 主要分布在以粉砂为主的沉积环境中, 与粒度存在负相关关系。盐度含量主要小于 0.5‰, 入海口处盐度含量较高, 自北向南呈递增变化 (图 2 C)。浑浊度大多小于 50 NTU, 与盐度含量存在相关性 (图 2 D), 自北向南整体呈递增变化。

4 生物遗迹特征

研究区内主要的造迹生物有螃蟹 (*Brachyura*)、沙蚕 (*Nereis succinea*)、弹涂鱼 (*Periophthalmus*) 以

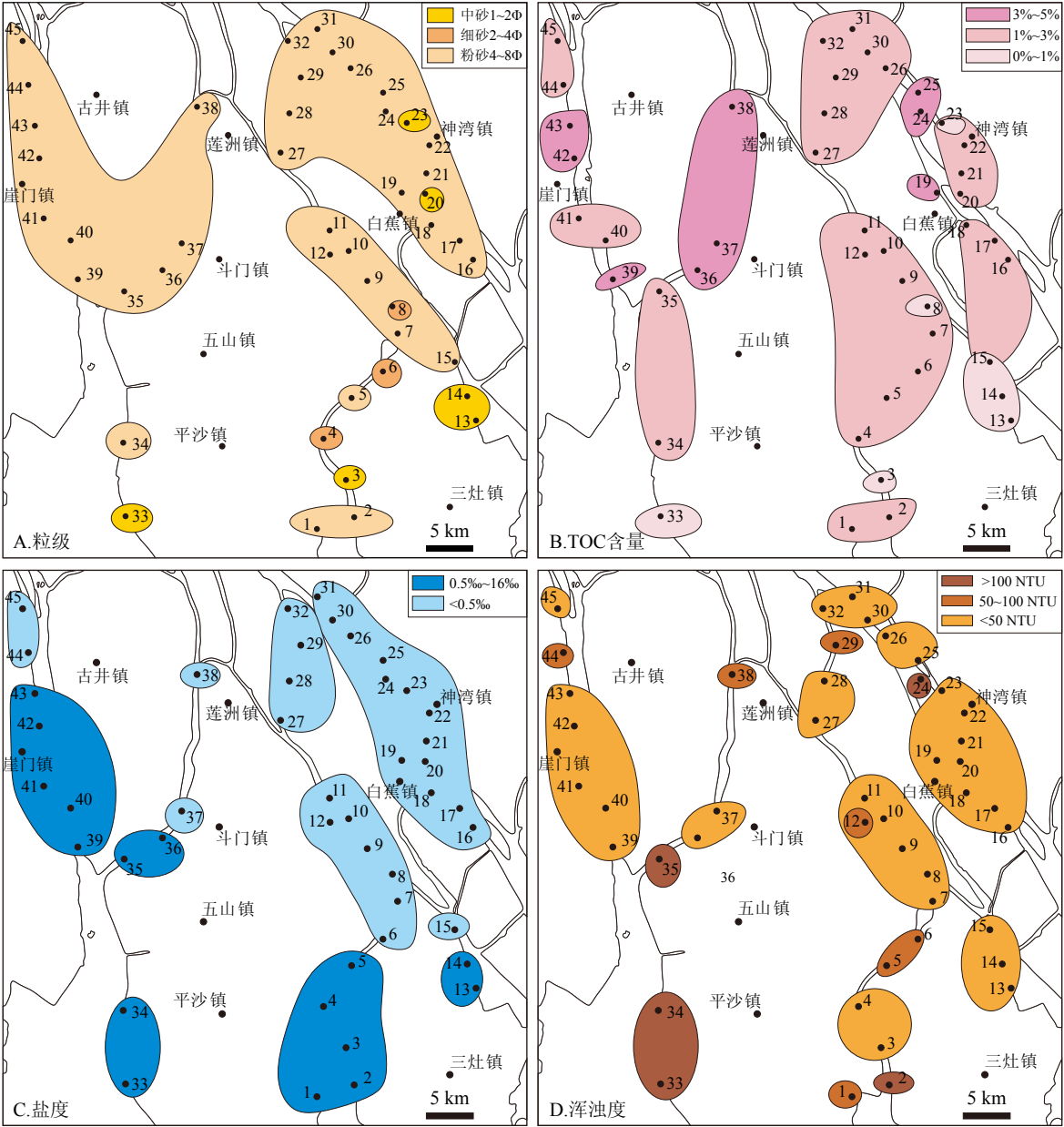


图 2 物化参数分布特征
Fig.2 Distribution characteristics of physical and chemical parameters

及双壳(*Bivalve*)动物, 部分采样点存在螺类(*Spiral*)和鸟类生物及痕迹。

4.1 主河道生物遗迹

主河道的造迹生物主要有丽彩拟瘦招潮(*Paraleptuca splendida*)、无齿东方相手蟹(*Orisarma*

dehaani)、中华东方相手蟹(*Orisarma sinense*)、字纹弓蟹(*Varuna litterata*)以及双齿围沙蚕(*Perinereis*)等。

丽彩拟瘦招潮是 34 号点位的主要造迹生物, 生物扰动明显。该生物潜穴层面呈典型的烟囱状(图 3 A), 层内潜穴呈 I 型, 在潜穴周围存在呈点坑状的足辙迹(图 3 B)。字纹弓蟹是 44 号点位的主

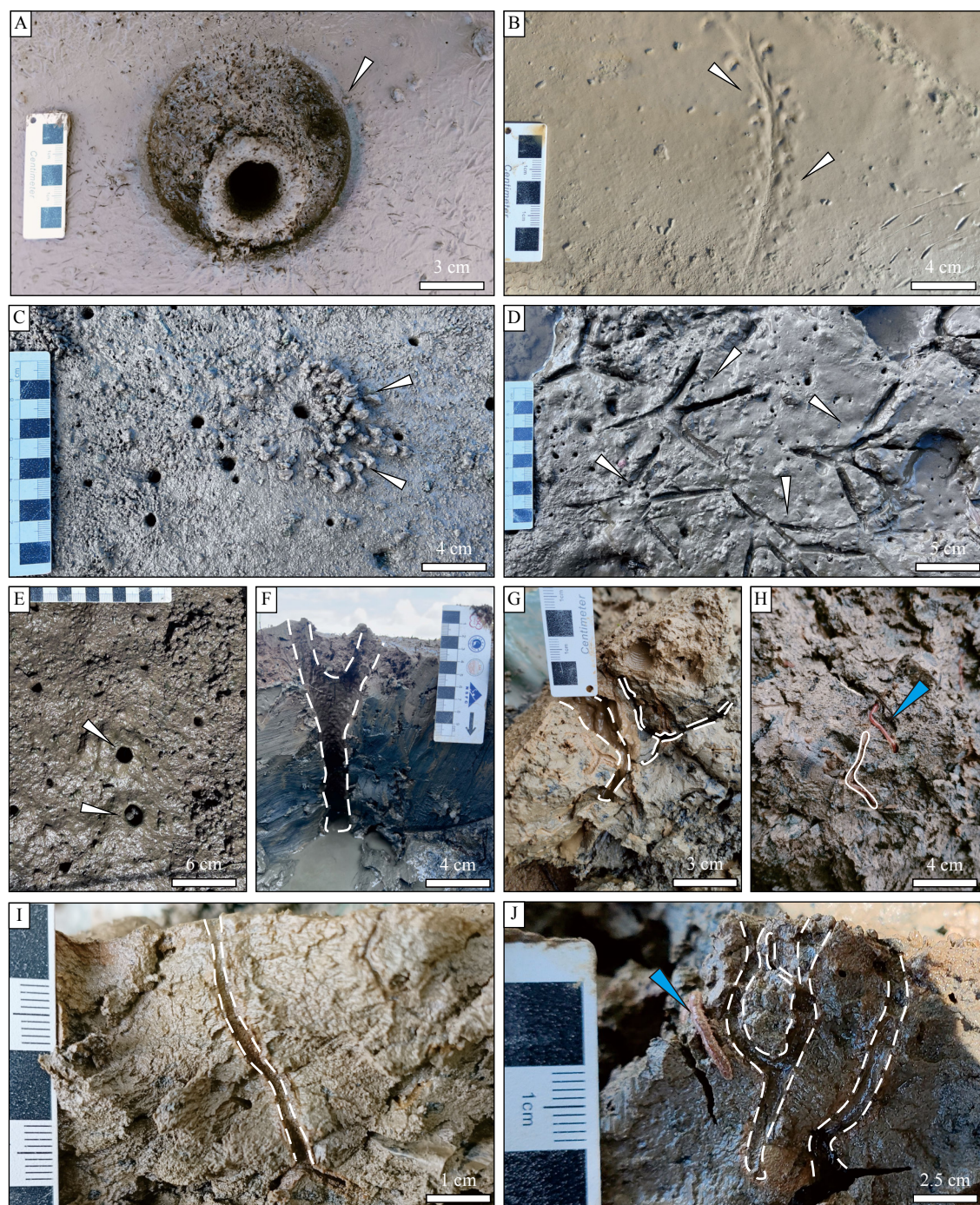


图 3 主河道 (A-B) 层面及分流河道层面 (C-E) 和层内 (F-J) 生物遗迹

A—C: 螃蟹潜穴穴口和足辙迹, D: 鸟足迹, E—F: 弹涂鱼 Y 型潜穴及穴口, G: 螃蟹 L 型、沙蚕 Y 型潜穴, H—J: 沙蚕不同形态潜穴。

Fig.3 The biological traces shown in surface of main river channel (A-B) and distributary channel (C-E), and in subsurface (F-J)

A-C: Burrow mouth and crab footprint, D: bird footprint, E-F: Y-shaped burrow and the mouth of *Periophthalmus cantonensis* burrow, G: the L- and Y-shaped burrows of crab and *Perinereis*, H-J: different shapes of *Perinereis*.

要造迹生物,生物扰动明显。该生物的层面穴口为近圆形,直径1~2 cm,有含水量较高的沉积物颗粒堆积,可能是潮汐涨落影响螃蟹居住而被挖出。无齿东方相手蟹和中华东方相手蟹的居住迹较前两者大,潜穴口直径约3 cm,且部分穴口有沉积物被挖出的痕迹。

双齿围沙蚕是26号点位的主要造迹生物,该点位沉积物为粉砂,浑浊度较低。该生物产生的层面遗迹主要为爬行迹,层内遗迹主要为居住迹。层内遗迹主要以潜穴为主,形态多为I型、L型和Y型,且潜穴密集,生物扰动明显。同时,观察到还有其与螃蟹共生现象。

4.2 分流河道生物遗迹

分流河道的造迹生物主要有丽彩拟瘦招潮(*Paraleptuca splendida*)、四齿大额蟹(*Metopograpsus quadridentatus*)、字纹弓蟹(*Varuna litterata*)、无齿东方相手蟹(*Orisarma dehaani*)、弹涂鱼(*Periophthalmus cantonensis*)、双齿围沙蚕(*Perinereis*)、河蚬(*Corbicula fluminea*)以及鸟类。这些生物产生的层面遗迹包括足辙迹、爬行迹、逃逸迹等,层内遗迹主要以居住迹为主。

丽彩拟瘦招潮是5号点位的主要造迹生物,生物扰动明显。该生物在层面留下的潜穴口直径约1 cm,在穴口周围有粪球状颗粒,可能是建造潜穴时挖出或是在潜穴周围食沉积物堆积而成(图3 C)。在5号点位还发现有鸟足迹(图3 D)。四齿大额蟹在点位3和点位6均有发现,生物扰动明显。3号点位潜穴呈烟囱状分布在砾石周围,穴口直径1~2 cm,基底较硬,周围还发现有鸟足迹。6号点位潜穴口有粪球状颗粒。在点位15水潭中发现有字纹弓蟹的足迹,该足迹杂乱无章,可能是受惊吓逃逸时所留下,觅食的可能性较小。无齿东方相手蟹分布较广,该环境下点位6和点位7均有分布。该生物在层面产生的遗迹有足辙迹、逃逸迹,层内潜穴呈Y型、I型等。

弹涂鱼是一种以泥质沉积物为食的两栖鱼类,该生物在层面中的遗迹主要为爬行迹、居住迹和觅食迹。在6号点位观察到完整的潜穴,层面有两个穴口便于受到威胁之后迅速返回潜穴,层内剖面为典型的Y型,潜穴底部水分渗透严重(图3 E-F)。在36号点位观察到弹涂鱼层面爬行的痕迹,爬行迹主要为拖迹,通过胸鳍支撑和推动身体前进,拖痕为沟槽状,形态为直型或曲型,长度可达15~20 cm,两侧有明显的胸鳍压痕。

双齿围沙蚕在多个点位均有分布。该生物是10号点位的主要造迹生物,生物扰动明显,未发现其他造迹生物。该点沉积物为细粉砂,含水量高,沙蚕的层内潜穴呈现L型,深度约3 cm(图3 H)。在一些点位存在沙蚕和螃蟹共生现象。如9号点位螃蟹潜穴呈现L型,内壁较光滑,可能是由于其分泌粘液对潜穴加固,沙蚕潜穴为明显的Y型,周边还存在双壳体所被覆盖的痕迹,推测为休息迹或者是死亡后的壳体被沉积物淹没(图3 G)。潜穴形态除Y型和L型外,观察到的双齿围沙蚕潜穴形态还包括简单形态I型和带有分支的复杂形态(图3 I-J)。

河蚬分布也比较广泛,产生的遗迹主要以居住迹或休息迹为主。河蚬潜穴所在沉积物一般为砂质沉积物,穴口呈椭圆形,约0.5~1 cm宽。层内潜穴一般为细长的简单形态如I型,且距离层面较近。

4.3 废弃河道生物遗迹

该环境中仅螃蟹一种造迹生物,未发现其他生物扰动。该生物层内潜穴呈L型、U型,穴口直径1~4 cm不等,深度约6 cm。

4.4 天然堤生物遗迹

天然堤的造迹生物主要有无齿东方相手蟹(*Orisarma dehaani*)、双齿围沙蚕(*Perinereis*)以及河蚬(*Corbicula fluminea*)。这些生物产生的层面遗迹包括足辙迹、爬行迹、逃逸迹等,层内遗迹主要以居住迹为主。

无齿东方相手蟹是45号点位的主要造迹生物,以层内居住潜穴为主要遗迹。潜穴形态呈I型,穴口直径约2 cm,深度可达10 cm。双齿围沙蚕在11和16号点位均有分布,是16号点位的主要造迹生物,生物扰动明显。11号点位的潜穴呈I型和V型,且在层面观察到其爬行迹(图4 A);16号点位存在与螃蟹共生现象,层内潜穴呈Y型,深度约3 cm,内壁较光滑(图4 B),且潜穴密度较高。

4.5 潮坪生物遗迹

潮坪的造迹生物主要有丽彩拟瘦招潮(*Paraleptuca splendida*)、无齿东方相手蟹(*Orisarma dehaani*)、字纹弓蟹(*Varuna litterata*)、大陆拟相手蟹(*Parasesarma continentale*)、双齿围沙蚕(*Perinereis*)和河蚬(*Corbicula fluminea*)。这些生物产生的层面遗迹包括足辙迹、爬行迹、逃逸迹等,层内遗迹主要以居住迹为主。

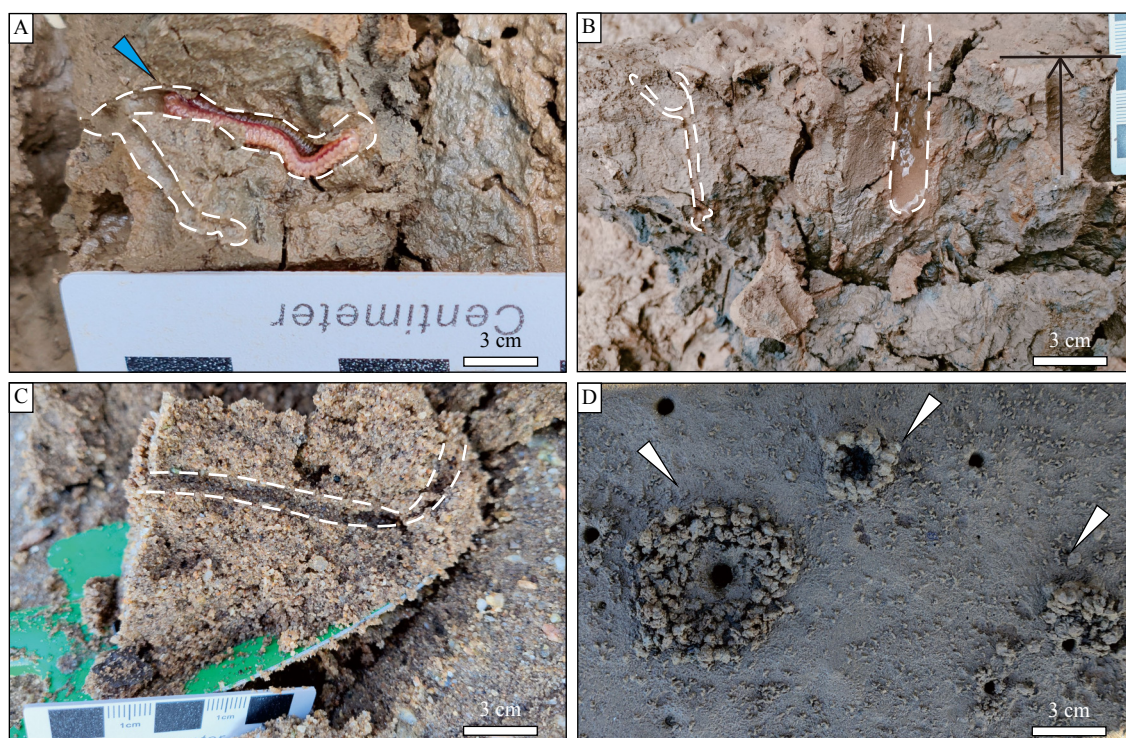


图 4 天然堤 (A-B) 层内及潮坪层面 (C) 和层内 (D) 生物遗迹

A: 沙蚕 V 型潜穴, B: 螃蟹 I 型、沙蚕 Y 型潜穴, C: 河蚶 L 型潜穴, D: 带粪球状颗粒的螃蟹穴口。

Fig.4 Biological traces on natural levee (A-B) and tidal flat (C), and subsurface (D)

A: The V-shaped burrow of *Perinereis*, B: the I- and Y-shaped burrows of crab and *Perinereis*, C: the L-shaped burrow of *Corbicula fluminea*, D: the burrow mouth with pellets or discharges of crab.

大陆拟相手蟹是 1 号点位的主要造迹生物, 未发现其他生物扰动。该生物在层面所造的遗迹有足辙迹 (图 5 A), 层内潜穴形态类似于 I 型, 直径约 1 cm, 深度约 5 cm (图 5 B)。分别在 1 号点位和 2 号点位采集柱状样品, 经三维重构结果显示: 1 号点位约 6 cm 深的近 Z 型或 L 型潜穴 (图 5 C), 其右切片呈现完整的 I 型 (图 5 D); 2 号点位约 3 cm 深的近 L 型潜穴 (图 5 E), 其右切片呈现近 I 型 (图 5 F)。

河蚶潜穴呈 L 型分布在砂质沉积物中, 穴口直径约 0.5 cm, 潜穴深度约 6 cm (图 4 C)。17 号点位螃蟹潜穴周围有明显的粪球状颗粒, 一方面是螃蟹建造潜穴时挖出, 另一方面可能是螃蟹进食后吐出的颗粒 (图 4 D)。

5 讨论

5.1 影响生物和遗迹分布的物化因素

首先, 生物及其遗迹的分布受多种因素的影响, 包括粒度、水动力条件、沉积速率、TOC 含量、盐度和浑浊度等 (图 6)。粒度、水动力以及沉积速

率三者是相辅相成的, 粒度越细, 水动力和沉积速率就越弱^[47]。而研究区内沉积物粒度以粉砂为主, 且受到河流和潮汐的共同作用, 因此能够为生物的生命活动提供良好的条件。TOC 含量的高低能够影响以有机质为食物来源的生物, 如部分螃蟹和弹涂鱼。一般情况下, TOC 含量越高, 生物丰度和分异度就越高^[48]。盐度和浑浊度对生物的生命活动影响较大, 盐度的过高或过低, 都会加速生物的死亡, 而对于广盐性生物的影响就相对较小^[49]。浑浊度能够影响生物觅食通道, 如高浑浊度会堵塞带有虹吸管的生物^[50-51], 如双壳类动物和沙蚕。对比不同区域的盐度和浑浊度, 研究区南部两者含量较北部高, 这也导致南部的生物遗迹丰度低于北部。

其次, 这些环境因素也会影响生物的物种多样性^[52]。如丽彩拟瘦招潮和无齿东方相手蟹的分布, 前者主要分布在受潮汐作用明显的地区, 而后者一般分布在受河流作用的环境中, 并且在研究过程中观察到前者的食物来源主要是沉积物中的有机质, 而后者除了有机质外还会以水中悬浮物作为食物来源。

最后, 人类活动也是影响生物和遗迹的一个重

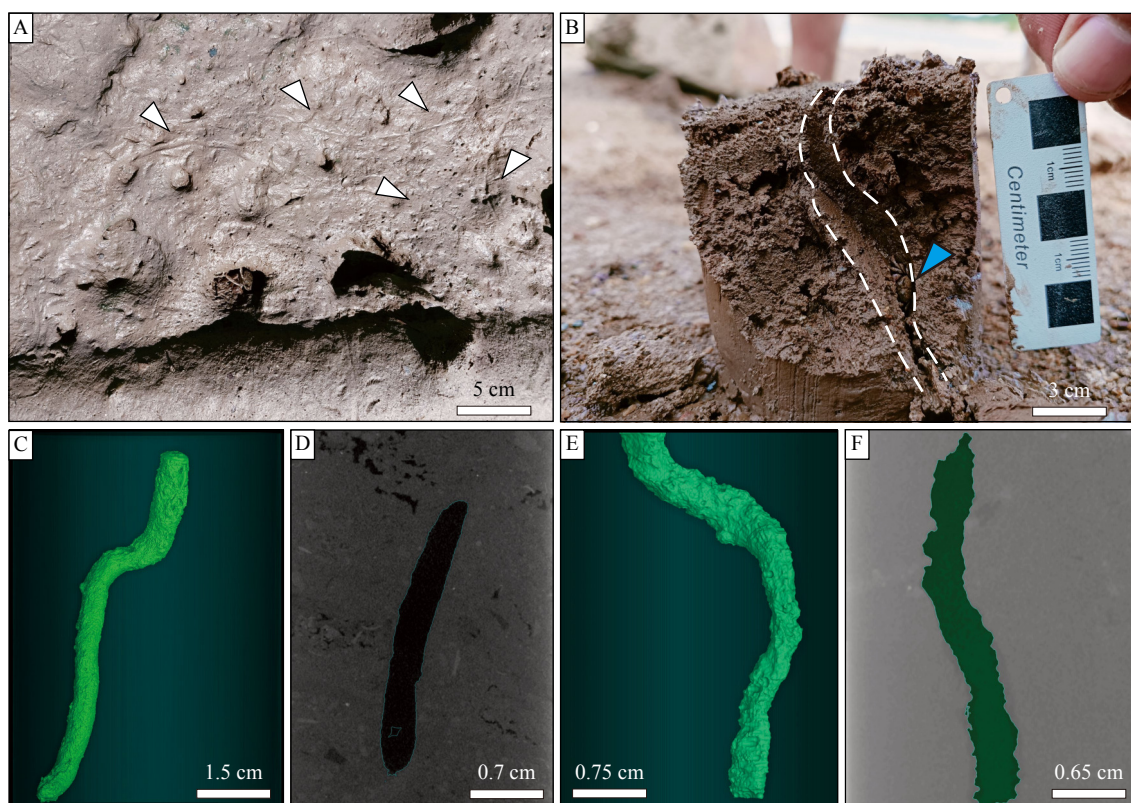


图5 潮坪层面 (A) 和层内 (B) 生物遗迹以及三维重构 (C 和 E) 模型

A: 螃蟹足辙迹, B: 螃蟹 I 型潜穴, C—D: 1 号点位三维重构模型及右切片, E—F: 2 号点位三维重构模型及右切片。

Fig.5 Biological traces on tidal flat (A) and subsurface (B), and the three-dimensional reconstruction (C and E)

A: Crab footprint, B: the I-shaped burrow of crab, C-D: the 3D model and the right section of Site 1, E-F: the 3D model and the right section of Site 2.

要因素。研究区位于下珠江三角洲平原, 采样点大多位于人类活动的区域, 因此也导致了不同区域内生物和遗迹在种类和数量上的差异。

5.2 对遗迹化石和遗迹相研究的类比意义

从前人对下三角洲平原遗迹化石和遗迹相研究方面: 下三角洲平原分布的遗迹化石包括 *Arenicolites*、*Cylindrichnus*、*Diplocraterion*、*Gyrolithes*、*Ophiomorpha*、*Palaeophycus*、*Planolites*、*Siphonichnus*、*Skolithos*、*Taenidium*、*Teichichnus*、*Thalassinoides* 等, 且属于 *Skolithos* 遗迹相和 mixed *Skolithos*-*Cruziana* 遗迹相 (表 1), 其中遗迹化石 *Arenicolites*、*Cylindrichnus*、*Diplocraterion*、*Ophiomorpha* 以及 *Skolithos* 是典型的 *Skolithos* 遗迹相代表。这些遗迹化石有层面分布的水平遗迹也有垂直层面分布的 I 型、U 型、L 型等潜穴系统, 造迹生物大多与环节类动物 (如沙蚕) 和甲壳类动物 (如螃蟹) 等有关。

从遗迹行为习性和可能的造迹生物的研究方面: 下珠江三角洲平原所研究的现代生物遗迹层面分布主要有足迹、爬行迹等, 层内潜穴形态有 Y 型、

L 型、I 型等, 这些特征与 *Arenicolites*、*Cylindrichnus*、*Diplocraterion*、*Ophiomorpha*、*Palaeophycus*、*Skolithos* 等遗迹化石相似, 并且现代造迹生物主要是环节类沙蚕、甲壳类螃蟹及双壳类生物 (图 7), 因此现代下珠江三角洲平原的现代生物遗迹进一步明确了上述遗迹化石可能的造迹生物 (表 1)。研究区内以潮汐作用的高能环境为主要特征, 主要为砂质沉积物, 且常见平行层理, 生物遗迹既有层面类型又有层内类型, 所观察到的螃蟹居住迹有简单的 I 型和 U 型等, 这与遗迹化石 *Arenicolites* 和 *Cylindrichnus* 及其地层岩性相似, 因此认为螃蟹是上述遗迹化石的可能造迹生物之一。所观察到的沙蚕居住迹包括简单的 I 型、U 型、Y 型和带有分支的复杂形态, 这与遗迹化石 *Skolithos* 和 *Planolites* 及其地层岩性相似, 因此认为沙蚕是这两种遗迹化石的可能造迹生物之一。所观察到的双壳造迹生物, 其潜穴主要为简单的 I 型, 这与遗迹化石 *Skolithos* 及其地层岩性相似, 因此认为双壳类动物是该遗迹化石的可能造迹生物之一。这些遗迹呈现 *Skolithos* 遗迹相特征, 因此可以建立相应的下珠江三角洲平原古遗迹

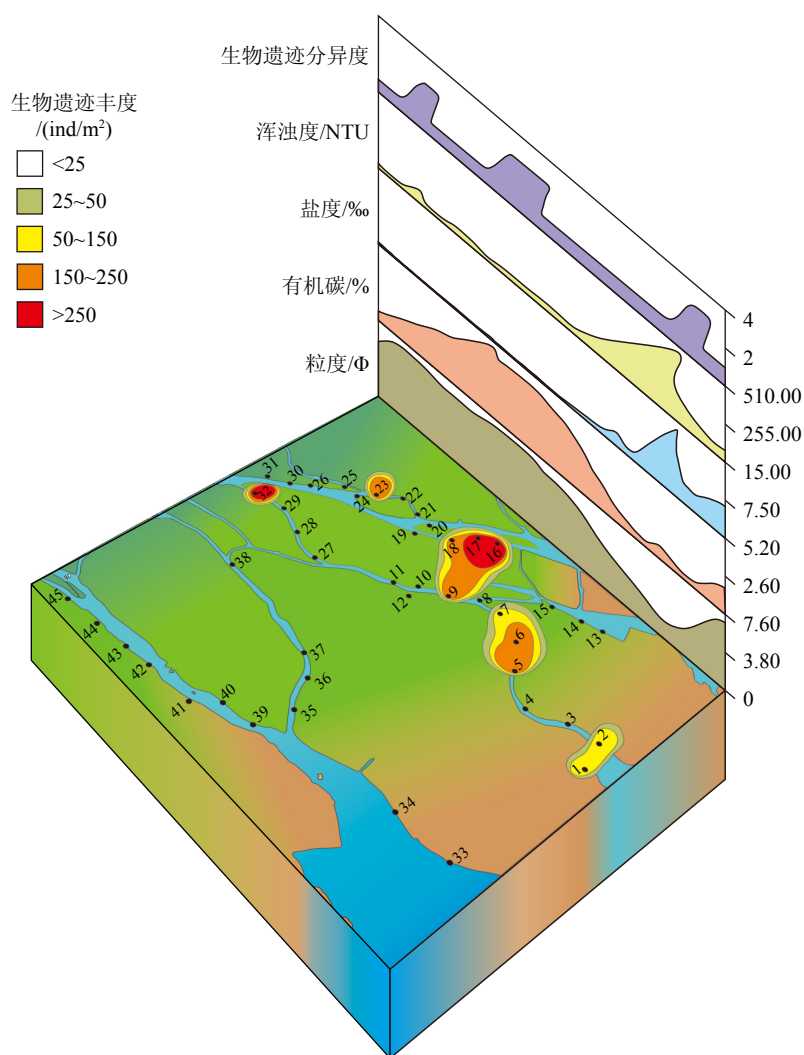


图 6 下珠江三角洲平原现代生物遗迹影响因素模式图

Fig.6 The model of physic-chemical factor of the neoichnology assemblage in the Lower Pearl River Delta Plain

分布模型。

从遗迹埋藏学研究方面: 研究过程中少有观察到与前人发现的遗迹化石尤其是与 *Cruziana* 遗迹相相关的现代生物遗迹, 可能原因如下: ① 所在环境不同: *Cruziana* 遗迹相通常可指示中等能量或低能环境, 且常见于日常浪基面以下、风暴浪基面以上的开阔边缘海环境, 研究区内多以潮汐作用影响的高能环境为主, 但是整体水深较浅, 不满足 *Cruziana* 遗迹相形成的水深条件。② 沉积物及水动力条件不同: *Cruziana* 遗迹相通常出现在粉砂—泥质沉积地层中, 多由水平痕迹组成且少有垂直排列的潜穴, 研究区内主要以中砂—粉砂质沉积物为主要特征, 水动力相对较强, 遗迹组合多为垂直潜穴。③ 营养类型不同: *Cruziana* 遗迹相的造迹生物多以沉积物中的有机质为食, 研究区内营养分布不均匀且以颗粒较细的粉砂等形式存在, 不利于被底栖生物获取和利用。因此, 大部分遗迹化石在下珠江三

角洲平原中未观察到类似的。

6 结论

(1) 研究区共划分为主河道、分流河道、废弃河道、天然堤和潮坪 5 个微环境, 生物遗迹主要分布在分流河道和潮坪环境中, 发现的生物遗迹可分为层面遗迹(足辙迹、爬行迹和排泄迹等)和层内遗迹(居住迹)。观察到的造迹生物有甲壳类动物螃蟹、环节动物沙蚕、双壳类动物河蚬、弹涂鱼以及鸟类等, 其中甲壳类螃蟹和环节动物沙蚕为主要造迹生物, 两者生物扰动率比其他生物高, 且部分点位存在共生现象。

(2) 物化因素对生物遗迹的丰度和分异度有一定的影响。在粒度较细、有机碳含量较高、盐度和浑浊度较低的环境中, 生物遗迹的丰度和分异度都相对较高。

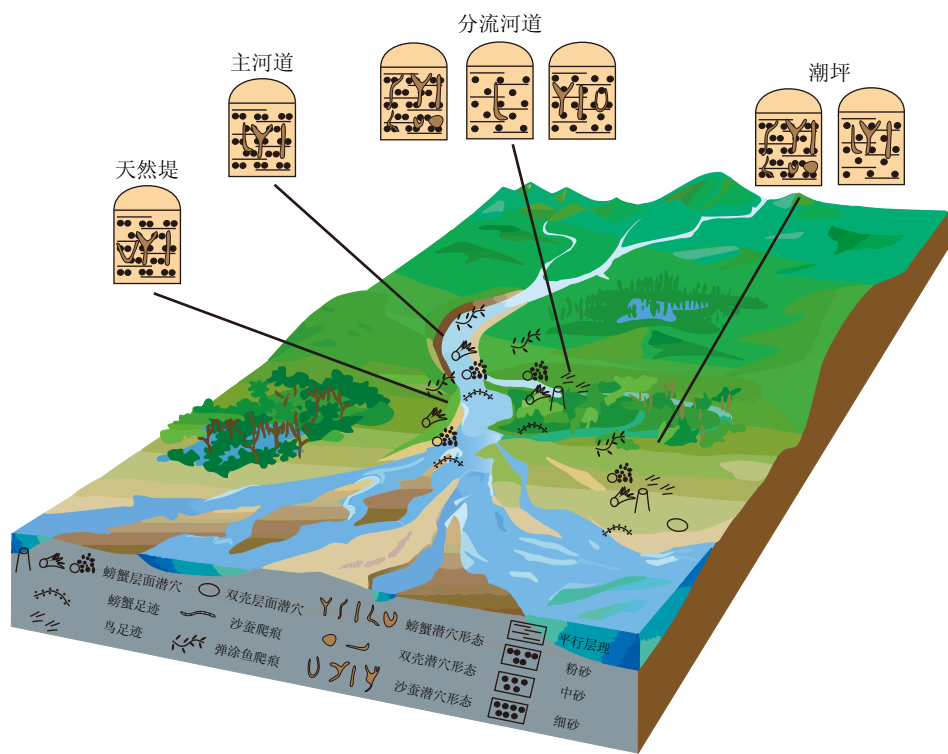


图 7 生物遗迹分布模式

Fig.7 Distribution pattern of biological traces

表 1 下三角洲平原遗迹化石特征^[53-65]

Table 1 Characteristics of trace fossils in the Lower Pearl River Delta Plain^[53-65]

遗迹化石	岩性	遗迹化石特征	现代遗迹类比	造迹生物	营养类型	遗迹相
<i>Arenicolites</i>	砂岩	垂直于层面的U形或圆柱形潜穴	√	蠕虫类	食悬浮物	
<i>Cylindrichnus</i>	砂岩	圆柱形潜穴	√	多毛类、甲壳类	食沉积物或食碎屑物	
<i>Diplocraterion</i>	砂岩	U形潜穴或哑铃形潜穴		多毛类或甲壳类	食沉积物或食碎屑物	
<i>Gyrolithes</i>	砂岩	垂直的螺旋状潜穴		甲壳类	食沉积物或食碎屑物	
<i>Ophiomorpha</i>	砂岩	垂直的具有分支的潜穴		甲壳类	食碎屑物	
<i>Palaeophycus</i>	泥岩或砂岩	垂直或弯曲的圆柱形潜穴		蠕虫类	食悬浮物	<i>Skolithos</i> Ichnofacies,
<i>Planolites</i>	砂岩	近圆柱到圆柱形的水平或倾斜构造的潜穴	√	蠕虫类	食沉积物	mixed <i>Skolithos</i> - <i>Cruziana</i> Ichnofacies
<i>Siphonichnus</i>	砂岩			双壳类	食悬浮物	
<i>Skolithos</i>	泥岩或砂岩	垂直到略微弯曲的圆柱形潜穴	√	环节类和蠕虫类	食悬浮物或被捕食者	
<i>Taenidium</i>	泥岩或砂岩	圆柱形无分支无衬里的回填潜穴		蠕虫类	食沉积物	
<i>Teichichnus</i>	泥岩或砂岩	水平或近倾斜的无衬壁潜穴		蠕虫类	食沉积物	
<i>Thalassinoides</i>	泥岩	有分支的水平或者垂直的潜穴		甲壳类	食碎屑物	

注：√表示在下珠江三角洲平原中观察到与遗迹化石相似的现代生物遗迹

(3)研究区内螃蟹居住迹有简单的I型和U型等,与遗迹化石 *Arenicolites* 和 *Cylindrichnus* 相似;沙蚕居住迹包括简单的I型、U型、Y型和带有分支的复杂形态,与遗迹化石 *Skolithos* 和 *Planolites* 相似;双壳潜穴主要为简单的I型,与遗迹化石

Skolithos 相似,并且研究区内主要呈现 *Skolithos* 遗迹相特征,这与上述遗迹化石所在遗迹相类似,进一步说明了上述3种遗迹化石的可能造迹生物类型。

致谢：感谢中国科学院南京土壤研究所陈捷

老师在CT扫描中的帮助,感谢中国科学院南京古生物地质研究所殷宗军老师、吴素萍老师和罗茂老师对三维重构的帮助,感谢泰山学院张伟老师对粒度分析的帮助,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] 金振奎,高白水,李桂仔,等.三角洲沉积模式存在的问题与讨论[J]. *古地理学报*, 2014, 16(5): 569-580. [JIN Zhenkui, GAO Baishui, LI Guizai, et al. Problems and discussions about delta depositional models[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(5): 569-580.]
- [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. [HU Bin, WANG Guanzhong, QI Yong'an. Theory and Application of Ichnology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1997.]
- [3] Bann K L, Fielding C R, MacEachern J A, et al. Differentiation of estuarine and offshore marine deposits using integrated ichnology and sedimentology: Permian Pebbly Beach Formation, Sydney Basin, Australia[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2004, 228(1): 179-211.
- [4] Gingras M K, Pemberton S G, Saunders T, et al. The ichnology of modern and Pleistocene brackish-water deposits at Willapa Bay, Washington: variability in estuarine settings[J]. *Palaos*, 1999, 14(4): 352-374.
- [5] Hamer J M M, Sheldon N D. Neoichnology at lake margins: implications for paleo-lake systems[J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 228(3-4): 319-327.
- [6] 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(1-4): 98-108.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Abdel-Fattah Z A. Morpho-sedimentary characteristics and generated primary sedimentary structures on the modern microtidal sandy coast of eastern Nile Delta, Egypt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, 150: 355-378.
- [10] De C. Neoichnological activities of endobenthic invertebrates in downdrift coastal Ganges delta complex, India: their significance in trace fossil interpretations and paleoshoreline reconstructions[J]. *Ich-nos*, 2000, 7(2): 89-113.
- [11] 郑思琦,林振文,李出安,等.珠江三角洲第四纪沉积物初始沉积年龄及沉积演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(6): 145-156. [ZHENG Siqi, LIN Zhenwen, LI Chu'an, et al. Discussion on the Quaternary initial sedimentary age and sedimentary evolution in the Pearl River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(6): 145-156.]
- [12] 黄镇国,李平日,张仲英,等.珠江三角洲地貌发育的新认识[J]. *台湾海峡*, 1984, 3(2): 189-198. [HUANG Zhenguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. A new approach to the geomorphological evolution of the Zhujiang Delta[J]. *Taiwan Strait*, 1984, 3(2): 189-198.]
- [13] 袁家义,梁国雄,陈木宏,等.广花平原全新世海侵的北界[J]. *中山大学学报*, 1986(3): 63-68. [YUAN Jiayi, LIANG Guoxiong, CHEN Muhong, et al. The limits of Holocene Transgression in Guangzhou-Huaxian Plain[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1986(3): 63-68.]
- [14] 张绍轩,汤永杰,郑翠美,等.珠江三角洲全新世海-陆沉积模式转换及其年代[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(5): 107-117. [ZHANG Shaoxuan, TANG Yongjie, ZHENG Cuimei, et al. Holocene sedimentary environment transform and onset time of Pearl River Delta progradation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(5): 107-117.]
- [15] 吴聪,陈焱新,彭志远,等.珠江口13-LD-ZK19钻孔沉积硅藻分布特征及其古环境响应[J]. *微体古生物学报*, 2020, 37(3): 285-293. [WU Cong, CHEN Chixin, PENG Zhiyuan, et al. Distribution characteristics and paleoenvironmental response of diatoms from Core 13-LD-ZK19 in the Estuary of Pearl River, China[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2020, 37(3): 285-293.]
- [16] 吉俊熹,时硕,陈莹璐,等.珠江三角洲全新世沉积物磁性特征及早期成岩作用分析[J]. *海洋学报*, 2022, 44(6): 89-105. [JI Junxi, SHI Shuo, CHEN Yinglu, et al. Magnetic characteristics and early diagenesis of Holocene sediments in the Zhujiang River Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(6): 89-105.]
- [17] 李炎华,侯卫生,陈秀文,等.珠江三角洲晚更新世地层三维结构重建及其指示意义[J]. *第四纪研究*, 2022, 42(3): 869-879. [LI Yanhua, HOU Weisheng, CHEN Xiuwen, et al. Reconstruction of 3D structures of the Late Pleistocene in Pearl River Delta and it indicating meaning[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(3): 869-879.]
- [18] 吴月琴,刘春莲,杨小强,等.珠江三角洲中部全新世以来的微体动物群记录与古环境重建[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 31-43. [WU Yueqin, LIU Chunlian, YANG Xiaoqiang, et al. Holocene microfaunal records in the central Pearl River Delta and implications for palaeoenvironmental changes[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(2): 31-43.]
- [19] 张丽丽,舒誉,蔡国富,等.珠江口盆地东部始新世—渐新世沉积环境演变及对烃源条件的影响[J]. *石油学报*, 2019, 40(S1): 153-165. [ZHANG Lili, SHU Yu, CAI Guofu, et al. Eocene-Oligocene sedimentary environment evolution and its impact on hydrocarbon source conditions in eastern Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S1): 153-165.]
- [20] 刘海,徐耀辉,李阳,等.海陆过渡相三角洲沉积体系陆源有机质沉积特征及其影响因素的模拟实验研究[J]. *沉积学报*, 2024, 42(1): 251-265. [LIU Hai, XU Yaohui, LI Yang, et al. Experimental simulation of Terrigenous organic matter sedimentary characteristics and its influencing factors in transitional facies delta depositional system[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(1): 251-265.]
- [21] 钟玉婷,董艳蕾,李顺利,等.珠三拗陷珠海组海陆过渡相沉积特征及储层控制因素[J]. *东北石油大学学报*, 2023, 47(4): 39-56,106.

- [ZHONG Yuting, DONG Yanlei, LI Shunli, et al. Sedimentary characteristics and reservoir controlling factors of Sea-land transition in Zhuhai Formation, Zhu-3 Depression[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2023, 47(4): 39-56,106.]
- [22] 刘幼萍. 珠江三角洲河网区变化环境下的河床演变趋势和水文极端事件 [J]. 水文, 2020, 40(3): 71-75,96. [LIU Youping. Tendency of fluvial process and hydrologic extreme events in River Network of Pearl River Delta under changing environment[J]. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(3): 71-75,96.]
- [23] 吴翼, 付淑清, 夏真. 伶仃洋钻孔岩芯的磁学记录及其对海水进退的响应 [J]. 海洋学报, 2021, 43(5): 88-99. [WU Yi, FU Shuqing, XIA Zhen. Magnetic variations of sediments from a drilling core in the Lingdingyang Bay, Zhujiang River Estuary, and their responses to marine transgression and regression[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(5): 88-99.]
- [24] 刘太胜, 姜沅林, 陆尧, 等. 珠江口海域沉积物中总氮总磷的空间分布特征 [J]. 广东化工, 2021, 48(16): 148-149. [LIU Taisheng, JIANG Yunlin, LU Yao, et al. Spatial distribution and pollution status of total Nitrogen and total Phosphorus in sediments of Pearl River Estuary and its adjacent area[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(16): 148-149.]
- [25] 吴伟, 刘俊成, 刘琮滢, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠江组陆架边缘三角洲沉积与生物遗迹特征 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2020, 44(4): 152-162. [WU Wei, LIU Juncheng, LIU Congying, et al. Sedimentary and ichnology characteristics of continental shelf-edge delta of Zhujiang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2020, 44(4): 152-162.]
- [26] 吴伟, 白晓婧, 刘惟庆, 等. 白云凹陷北坡珠江组下部储层生物遗迹及沉积演化特征 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2023, 47(1): 12-24. [WU Wei, BAI Xiaojing, LIU Weiqing, et al. Characteristics of sedimentary reservoirs trace fossils and sedimentary evolution in the lower Zhujiang Formation on north slope of Baiyun Sag[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2023, 47(1): 12-24.]
- [27] 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: Chinese Edition*, 2022, 24(6): 1179-1192.]
- [28] 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.]
- [29] 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.]
- [30] 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]. *Palaio*, 2019, 34(5): 271-279.
- [31] 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]. *Palaeworld*, 2019, 28(4): 514-524.
- [32] Wang Y Y, Gou S L, Wang C, et al. The crab *Macrophthalmus japonicus* burrows on a tidal flat of the Yellow River Delta in China: their 3D morphological variability in relation to physicochemical conditions and palaeoichnological perspective[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 638: 112037.
- [33] 王海邻, 王长征, 宋慧波, 等. 杭州湾庵东滨岸潮间带现代沉积物中的生物遗迹特征 [J]. 沉积学报, 2017, 35(4): 714-729. [WANG Hailin, WANG Changzheng, SONG Huibo, et al. Characteristic of Biogenic Traces in the Modern Sediments of Intertidal Flat in Andong area, Hangzhou Bay[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(4): 714-729.]
- [34] 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]. 沉积学报, 2024, 42(5): 1512-1529. [WANG Yuanyuan, GOU Songlin, ZHANG Guocheng. Composition and distribution characteristics of biological traces in the Pearl River Delta front[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(5): 1512-1529.]
- [35] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变 [M]. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982: 278. [HUANG Zhenguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. Formation, Development and Evolution of the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Science and Technology of China Press, 1982: 278.]
- [36] 曾昭璇. 珠江三角洲地貌发育 [M]. 广州: 暨南大学出版社, 2012. [ZENG Zhaoxuan. Geomorphic Development of the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Jinan University Press, 2012.]
- [37] 马道修, 徐明广, 周青伟, 等. 珠江三角洲沉积相序 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1988, 8(1): 43-53. [MA Daoxiu, XU Mingguang, ZHOU Qingwei, et al. Sedimentary facies sequences of the Zhujiang River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1988, 8(1): 43-53.]
- [38] 龙云作, 霍春兰, 杨胜雄. 珠江三角洲现代沉积环境及沉积特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1989, 9(4): 15-27. [LONG Yunzuo, HUO Chunlan, YANG Shengxiong. Modern sedimentary environment and characteristics of the Zhujiang River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1989, 9(4): 15-27.]
- [39] 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.]
- [40] 吴超羽, 韦愷. 从溺谷湾到三角洲: 现代珠江三角洲形成演变研究辨析 [J]. 海洋学报, 2021, 43(1): 1-26. [WU Chaoyu, WEI Xing. From drowned valley to delta: discrimination and analysis on issues of the formation and evolution of the Zhujiang River Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(1): 1-26.]
- [41] 崔伟强. 珠江三角洲平原地区气候、雨量站网最佳密度的探讨 [J]. 热带气象, 1986, 2(3): 268-274. [CUI Weiqiang. The study of optimum

- um density of climate and rainfall station networks over Zhujiang plain area[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1986, 2(3): 268-274.]
- [42] 薛春江, Eisma E, 成国栋, 等. 黄河三角洲下三角洲平原沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1993, 13(1): 33-40. [XUE Chunting, Eisma E, CHENG Guodong, et al. Depositional environment of lower delta plain of Yellow River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1993, 13(1): 33-40.]
- [43] 许桂生, 王文祥, 赵仲生, 等. 受潮汐影响的下三角洲平原聚煤作用[J]. *煤田地质与勘探*, 1997, 25(2): 7-10. [XU Guisheng, WANG Wenxiang, ZHAO Zhongsheng, et al. Coal accumulation on the tide influenced lower delta plain[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1997, 25(2): 7-10.]
- [44] 龙云作, 霍春兰, 司桂贤, 等. 对珠江三角洲沉积特征和沉积模式的一些认识[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 5(4): 49-57. [LONG Yunzuo, HUO Chunlan, SI Guixian, et al. On sedimentary characteristics and model of Zhujiang River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1985, 5(4): 49-57.]
- [45] 张光威, 马道修, 徐明广, 等. 珠江口现代沉积物构造特征及其沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1988, 8(3): 71-83. [ZHANG Guangwei, MA Daoxiu, XU Mingguang, et al. Sedimentary environments and structures of modern sediments in the mouth of Zhujiang River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1988, 8(3): 71-83.]
- [46] 周曾, 刘瑶, 吴一鸣, 等. 河口海岸沉积层理特征与形成机制[J]. *水科学进展*, 2024, 35(1): 167-182. [ZHOU Zeng, LIU Yao, WU Yiming, et al. Sedimentary stratigraphic characteristics and formation mechanisms of estuarine coasts[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(1): 167-182.]
- [47] 李勇, 李海燕, 赵应权. 沉积物粒度特征及其对环境的指示意义: 以濠河为例[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2015, 45(3): 918-925. [LI Yong, LI Haiyan, ZHAO Yingquan, et al. Grain size characteristics of Haohe River sediments and its environmental implications[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2015, 45(3): 918-925.]
- [48] 胡斌, 王媛媛, 张璐, 等. 黄河中下游焦作区段现代边滩沉积中的生物遗迹[J]. *古地理学报*, 2012, 14(5): 628-638. [HU Bin, WANG Yuanyuan, ZHANG Lu, et al. Biogenic traces in modern point bar deposits of the Middle-Lower Reaches of Yellow River in Jiaozuo area, Henan Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(5): 628-638.]
- [49] Schäfer W. Wirkungen der Benthos-Organismen auf den jungen Schichtverband[J]. *Senckenbergiana Lethaea*, 1956, 37(3-4): 183-263.
- [50] Van Wagoner J C. Sequence stratigraphy and marine to nonmarine facies architecture of foreland Basin strata, Book Cliffs, Utah, U. S. A. : reply[J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(8): 1607-1618.
- [51] Pattison S A J. Sequence stratigraphic significance of sharp-based lowstand shoreface deposits, Kenilworth member, Book Cliffs, Utah[J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(3): 444-462.
- [52] 张轶超. 大兴安岭林区不同纬度白桦天然林林下植物物种多样性及其影响因素研究[D]. 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2023. [ZHANG Yichao. Understory plant species diversity and its influencing factors in *Betula platyphylla* natural forest at different latitudes in the Greater Khingan Mountains[D]. Master Dissertation of Inner Mongolia Agricultural University, 2023.]
- [53] MacEachern J A, Bann K L, Bhattacharya J P, et al. Ichnology of deltas: organism responses to the dynamic interplay of rivers, waves, storms, and tides[J]. *Society for Sedimentary Geology*, 2005, 83: 49-85.
- [54] Pollard J E, Goldring R, Buck S G. Ichnofabrics containing *Ophiomorpha*: significance in shallow-water facies interpretation[J]. *Journal of the Geological Society*, 1993, 150(1): 149-164.
- [55] Locklair R E, Savrda C E. Ichnofossil tiering analysis of a rhythmically bedded chalk-marl sequence in the Upper Cretaceous of Alabama[J]. *Lethaia*, 1998, 31(4): 311-321.
- [56] Coates L, Maceachern J A. The ichnological signature of wave- and river-dominated deltas: Dunvegan and Basal Belly River formations, West-Central Alberta[J]. *CSPG and Petroleum Society Joint Convention*, 1999: 29-46.
- [57] Savrda C E, Blanton - Hooks A D, COLLIER J W, et al. *Taenidium* and associated ichnofossils in fluvial deposits, Cretaceous Tuscaloosa Formation, eastern Alabama, southeastern U. S. A[J]. *Ichnos*, 2000, 7(3): 227-242.
- [58] Sáez A, Anadón P, Herrero M J, et al. Variable style of transition between Palaeogene fluvial fan and lacustrine systems, southern Pyrenean foreland, NE Spain[J]. *Sedimentology*, 2007, 54(2): 367-390.
- [59] Gani M R, Bhattacharya J P, MacEachern J A. Using ichnology to determine the relative influence of waves, storms, tides, and rivers in deltaic deposits: examples from Cretaceous Western Interior Seaway, U. S. A. [M]//MacEachern J A, Bann K L, Gingras M K, et al. *Applied Ichnology*. Tulsa: SEPM, 2007, 52: 209-225.
- [60] Aguirre J, De Gibert J M, Puga-Bernabéu A. Proximal-distal ichnofabric changes in a siliciclastic shelf, Early Pliocene, Guadalquivir Basin, southwest Spain[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 291(3-4): 328-337.
- [61] Hofmann R, Mángano M G, Elicki O, et al. Paleoeologic and biostratigraphic significance of trace fossils from shallow- to marginal-marine environments from the middle Cambrian (Stage 5) of Jordan[J]. *Journal of Paleontology*, 2012, 86(6): 931-955.
- [62] Frey R W, Howard J D. Trace fossils and depositional sequences in a clastic shelf setting, Upper Cretaceous of Utah[J]. *Journal of Paleontology*, 1990, 64(5): 803-820.
- [63] Bromley R G, Frey R W. Redescription of the trace fossil *Gyrolithes* and taxonomic evaluation of *Thalassinoides*, *Ophiomorpha* and *Spongiomorpha*[J]. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 1974, 23: 311-335.
- [64] Moosavizadeh S M A, Knaust D. The trace fossil *Gyrolithes lorcaensis* from the Lower Cretaceous of the Kopet-Dagh Basin, NE Iran[J]. *Ichnos*, 2022, 29(1): 11-26.
- [65] McIlroy D. Ichnology of a macrotidal tide-dominated deltaic depositional system: Lajas formation, Neuquén province, Argentina[M]//Bromley R G, Buatois L A, Mángano G, et al. *Sediment-Organism Interactions: A Multifaceted Ichnology*. Tulsa: SEPM, 2007, 88: 195.