

文章编号: 1671-1505(2025)03-0667-17 DOI: 10.7605/gdxb.2025.00.027

珠江三角洲平原螃蟹遗迹特征 及其对古环境的指示意义*

王媛媛 张亚斌 勾松林

河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454003

摘要 螃蟹是生态环境工程师, 可以灵敏反映和改造其所在的沉积和生态环境。珠江三角洲平原地区沉积环境复杂, 螃蟹种类多样且数量丰富, 但区域内不同种类螃蟹的分布和组成特征及其对古环境的指示意义尚缺乏研究。本文在珠江三角洲平原选取 92 个采样点进行水样、土样采集, 个别采样点进行生物潜穴的取心, 同时观察和拍照记录各个采样点螃蟹遗迹的分布与特征, 利用盐度、粒度分析、CT 扫描和三维重构等方法对沉积环境和螃蟹遗迹进行研究。结果表明: (1) 珠江三角洲平原主要生活的螃蟹有方蟹总科相手蟹属无齿东方相手蟹、中华东方相手蟹和沙蟹总科沙蟹属丽彩拟瘦招潮等, 它们形成的遗迹包括足辙迹、觅食迹、排泄迹、潜穴等, 潜穴形状大多为 I 形、J 形, 还有少量 Y 形。(2) 螃蟹遗迹主要分布在受潮汐影响的潮间带位置, 其中河口区域螃蟹遗迹的丰度最高, 分流河道和滨海湿地相对较少。(3) 类比发现, 螃蟹遗迹的形态特征和沉积环境与遗迹化石 *Psilonichnus* 类似, 主要分布在潮间带的坚固地面环境中, 与螃蟹遗迹相关的遗迹相为 *Glossifungites* 相、*Psilonichnus* 相和 *Skolithos* 相。该研究不仅补充了珠江三角洲平原的现代沉积学资料, 而且还揭示出螃蟹遗迹对古环境的指示意义, 为地质学和生态学研究提供了重要线索和依据。

关键词 现代生物遗迹 遗迹学 螃蟹 遗迹化石 珠江三角洲

第一作者简介 王媛媛, 女, 1984 年生, 博士, 河南理工大学资源环境学院副教授, 主要从事沉积学、遗迹学研究。E-mail: yyw@hpu.edu.cn。

中图分类号: Q958.1 文献标志码: A

Characteristics of modern crab traces in the Pearl River Delta Plain and their significance as indicators of palaeoenvironments

WANG Yuanyuan ZHANG Yabin GOU Songlin

Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Henan Jiaozuo 454003, China

Abstract Crabs serve as ecological engineers capable of sensitively reflecting and modifying sedimentary and ecological environments in which they reside. The sedimentary environment of the Pearl River Delta Plain is highly complex, which is characterized by a diverse and abundant crab population. This paper focuses on investigating the distribution and compositional characteristics of different crab species within the region, as well as their significance in indicating paleoenvironments. A total of 92 sampling points in the Pearl River Delta Plain were established to collect water samples, soil samples, and biogenic submerged burrow cores. Observations and photographic documentation were conducted to record the distribu-

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42172130) 资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42172130)]

收稿日期: 2024-06-12 改回日期: 2024-10-21

tion and characteristics of crab traces at each sampling point. Subsequently, sedimentary environments and crab traces within the study area were analyzed using methods such as salinity measurement, granulometric analysis, CT scanning, and three-dimensional reconstruction. Key findings include: (1) The predominant crab species identified were *Orisarma dehaani* and *Orisarma sinense* from the family Grapsidae, Grapsoidea, and *Paraleptuca splendida* from the family Ocypodidae, Ocypodoidea. Crab traces included tracks, fodinichnia, waste trails, and burrows, with most burrows exhibiting I-and J-shaped configurations and a few Y-shaped structures. (2) Crab traces were predominantly distributed in intertidal zones influenced by tides, with the highest abundance observed in estuarine areas, and relatively fewer traces in diversion channels and coastal wetlands. (3) Through analogy, it was determined that the morphological characteristics and depositional environments of crab traces resemble those of the trace fossil *Psilonichnus*, which is primarily found in shallow marine firmground environments. Additionally, trace phases associated with crab traces include *Glossifungites*, *Psilonichnus*, and *Skolithos*. This study contributes modern sedimentological data for the Pearl River Delta Plain, reveals the paleoenvironmental significance of crab traces, and provides critical evidence for geological and ecological research.

Key words modern biological traces, ichnology, crabs, trace fossil, Pearl River Delta

About the first author WANG Yuanyuan, born in 1984, doctor, associate professor, is mainly engaged in sedimentology and relic research. E-mail: yyw@hpu.edu.cn.

遗迹学是研究现代（新遗迹学）和古代（古遗迹学）生物生活时在沉积物底层中遗留下来的活动遗迹（胡斌等，1997），国内研究成果颇丰（龚一鸣等，2009；胡斌等，2021）。现代生物遗迹的分布和组成与沉积环境密切相关，沉积作用过程复杂，受物理、化学及生物三者相互作用和影响（宋慧波等，2014；王媛媛等，2024）。在珠江三角洲平原环境中，螃蟹遗迹颇为丰富。由于螃蟹在不同沉积环境中的组成和分布情况不同，其营造的遗迹也存在差异，因此可以通过研究螃蟹遗迹的组成和分布特征分析沉积环境。通过将各种螃蟹遗迹与类似的遗迹化石进行类比（王媛媛等，2020），不仅为遗迹化石研究提供现代实证，同时提供了可能形成这些遗迹化石的造迹生物，这对遗迹化石及古环境的研究具有重要意义（胡斌等，2012；王媛媛等，2019；王翠，2022；王海邻等，2022）。

本研究选取珠江三角洲平原为研究区。之前对该区域的研究主要集中在水文特征（赵焕庭，1983，1989）、沉积特征（龙云作等，1985，1989；张光威，1988；张光威等，1988；陈耀泰，1992）等物理沉积方面，同时对珠江三角洲的形成与演化进行了研究（赵焕庭，1982；苏亚芳，1992）。也有学者对珠江三角洲展开了古环境及变迁的研究（王建华等，2009；吴洁等，2014；殷鉴

等，2016；吴月琴等，2019），但很少有学者对该区域内的现代生物遗迹进行研究（潘保柱等，2011；王媛媛等，2024）。本次研究对珠江三角洲平原环境中现代生物螃蟹的种类及其遗迹的分布和组成展开详细研究，研究结果不仅可为珠江三角洲平原现代沉积研究提供实证基础，而且还可为古三角洲平原沉积特征和螃蟹迹的研究提供现代遗迹学依据。

1 研究区概况

珠江三角洲位于广东省的中南部，毗邻港澳，东、北、西三面被山地、丘陵环绕，南面向海（图1）。珠江三角洲是由3条大江东江、西江和北江以及三角洲下游的诸多河流合力冲积而成的一个复合三角洲（苏亚芳，1992；韦惺等，2018；吴超羽和韦惺，2021；袁菲等，2022），其复杂的地形、较多的河流和众多的岛屿造成了沉积环境的区域差异性和独特性（赵焕庭，1984；张绍轩等，2020；吴超羽等，2021）。

珠江三角洲水网发达，河道平缓，流域总面积约为 $45.37 \times 10^4 \text{ km}^2$ （赵焕庭，1983；戴仕宝等，2007），多年平均输沙量约为 0.283 kg/m^3 ，年最大输沙量可达 $0.383 \times 10^8 \text{ t}$ ，具有含沙量小、输沙量大的特点。西江年径流量为 $2460 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占整个

珠江总径流量的 72%，北江和东江仅占 14% 和 9%（王珊珊，2008）。在径流为主导动力的支配下，西江的碎屑沉积物随搬运距离不同而有所差异，表明西江径流是三角洲发育的重要动力之一（程明豪，1984）。研究区属于南亚热带海洋性季风气候，年平均气温 21~23℃，年平均降水量为 1600~2600 mm（赵焕庭，1989；王珊珊，2008；张绍轩等，2020）。珠江口潮汐类型为不规则半日潮型，平均潮差为 1.00~1.57 m，属于弱潮河口（张蔚等，2010；Li *et al.*, 2016）。在河流与海洋的相互作用和影响下，珠江三角洲的沉积速率及沉积作用呈现出复杂性和特殊性。

本次研究对象为珠江三角洲平原区各分流河道和河口沉积环境，其给螃蟹提供了适宜的生活条件，从而造成了螃蟹种类的丰富性和多样性。文中主要研究该地区不同种类螃蟹及其遗迹的分布和组成特征，以及它们对古环境的指示意义。

2 研究方法

2.1 取样

采样点位于珠江三角洲平原区域内珠海市、江门市、佛山市、中山市、广州市、东莞市等沿岸地区。从珠海出发，沿着西江自南向北行进，平均每 1.5~2.5 km 确定一个采样点。在此过程中，对

西江附近的支流和潭江等水域也进行了取样。同时，手持 GPS 全球定位系统记录经纬度位置，并根据经纬度在 Google Earth Pro 上进行标记，共确定 92 个采样点（图 2）。在每个采样点进行水样和沉积物样品的采集，水样使用 100 mL 的取样存储密封瓶采集保存，沉积物样品使用样品自封袋采集密封保存。另外，对点位内螃蟹的分布形式及遗迹特征进行拍照和记录，主要观察螃蟹及其遗迹在特定研究区域中的空间分布状况，包括其在不同地理位置、沉积物底质类型、盐度等环境条件下的丰度和分异度等。对个别采样点形态保存完好且具有代表性的螃蟹潜穴，使用直径为 7.5 cm、高度为 15 cm 的 PVC 管进行生物潜穴的取心。取心时需注意螃蟹潜穴所处的沉积物底层结构，应避免存在碎石和树根等难以采集的区域。对取心完成后的 PVC 管进行运输至扫描的过程中，需始终保持 PVC 管潜穴口向上直立稳定的状态，以防止其内部结构遭到破坏。

2.2 盐度测量和粒度分析

对水样盐度的测量采用的是精度较高的电导率法。具体步骤如下：将电导率仪平稳地放在桌面上，接入电源并插入电极，然后校准仪器并将可调电极浸入采集的待测水样，读取结果并记录，测试 3 次取平均值。使用的电导率仪型号为 SX813，测试精

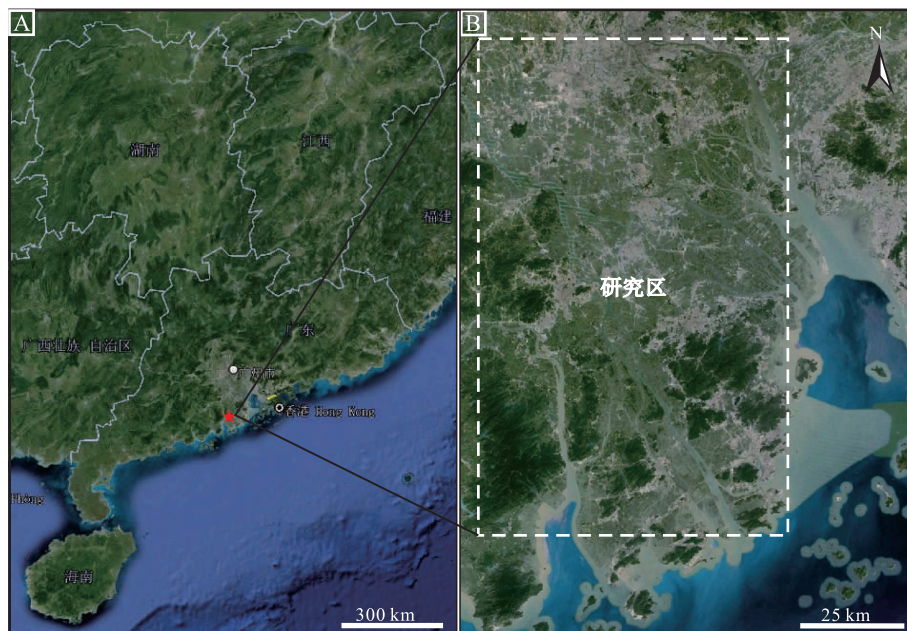


图 1 珠江三角洲平原位置图（卫星底图来自于 Google Earth Pro）

Fig. 1 Location map of the Pearl River Delta Plain (the satellite basemap from Google Earth Pro)

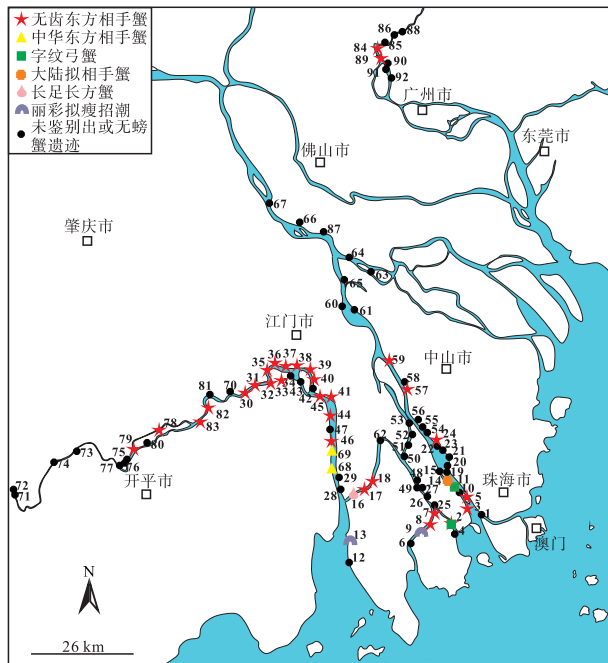


图 2 珠江三角洲平原采样点分布
Fig. 2 Distribution map of sampling sites
in the Pearl River Delta Plain

度为 $\pm 1\%$ ，分辨率 0.01。

在粒度分析前，在实验室将土样进行风干干燥处理。之后称取大概 50 g 左右放入样品袋，用 Rise 激光粒度分析仪进行粒度分析。

水样的盐度测量结果和土样的粒度分析结果见表 1。

2.3 CT 扫描和三维重构

将采集的岩心送往中国科学院南京土壤研究所进行 CT 扫描，实现对岩心内部空间结构形貌特征的高效、无损透视，可视化地呈现出生物潜穴的形态特征。X 射线检测扫描仪参数如下：型号是 Nanotom S，电压为 180 kV，功率为 15 W，几何放大倍率（3D）为 1.5~100 倍，图像链为 500 万像素的全数字化。

三维重构就是借助计算机对 CT 扫描后的图像进行后期的可视化处理，重建岩心内部空间的三维形态，以便能够从多角度、多方位观察具有色彩纹理的三维图像。使用的软件为 3D Studio Max 3.0 和 Image J，主要使用的功能有灰度值分割处理、堆栈处理、提取潜穴、3D 渲染、上色、动画制作等功能。该实验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。

3 沉积构造特征

珠江三角洲平原的沉积物成分主要包括岩石碎屑、生物碎屑和化学沉积物，沉积构造十分复杂，常受到河流冲刷、海水冲刷、风力侵蚀等自然因素的影响，沉积层位具不连续性和异质性。沉积物类型多样，主要包括沙、粉沙、黏土、壳屑、有机质等（张光威，1988）。研究区内发现的沉积构造有泥沙互层的平行层理（图 3-A）、浪成波痕（图 3-B）、干涉波痕（图 3-C）、纵向波痕（图 3-D）等。

4 生物遗迹特征

螃蟹属于甲壳动物亚门软甲纲十足目短尾下目，是生态环境工程师，可以灵敏反映和改造其所在的沉积和生态环境（王金庆，2008）。研究区主要遗迹种为方蟹总科相手蟹科属无齿东方相手蟹（*Orisarma dehaani*）、中华东方相手蟹（*Orisarma sinense*）和大陆拟相手蟹（*Parasesarma continentale*），弓蟹科属字纹弓蟹（*Varuna litterata*）和长足长方蟹（*Metaplox longipes*）以及沙蟹总科沙蟹科属丽彩拟瘦招潮（*Paraleptuca splendida*）。研究区螃蟹的主要生物遗迹有爬行迹、觅食迹（进食迹）、逃逸迹、停息迹、排泄迹和穴居构造，这些遗迹的分布与当地的环境条件（如潮汐、沉积物类型和植被覆盖）密切相关（Rodríguez-Tovar *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2019）。

4.1 无齿东方相手蟹 *Orisarma dehaani*

无齿东方相手蟹为方蟹总科相手蟹科属，主要出现在点位 2、3、5、7、8、17、18、24、30~33、35~41、44~46、57、59、78、79、82~84、89。由点位观察情况来看，无齿东方相手蟹（图 4-A，4-B）主要分布在河口潮上带至高潮带，沉积物底质大多为黏性底质，以淤泥黏土居多，生活环境多为植被较茂密的沼泽或滩涂，进食主要以沉积物中的有机物、米草和芦苇丛的植物叶片为主。其营造的遗迹主要有觅食迹、排泄迹（图 4-D）、爬行迹和居住潜穴（图 4-C）等。排泄迹为螃蟹在潜穴口周围排泄的消化道残渣，呈长度为 0.5 cm 左右的细条状物。潜穴遗迹形态比较多样，潜穴口多为近圆形（图 4-F），潜穴直径 0.5~3.5 cm，无衬里，通常由 1 个或多个的永久轴组成，轴向基底延伸

表 1 珠江三角洲平原采样点的盐度、粒度、螃蟹种类及潜穴密度和生物扰动率
(部分采样点未观察到螃蟹或未鉴别出螃蟹种类)

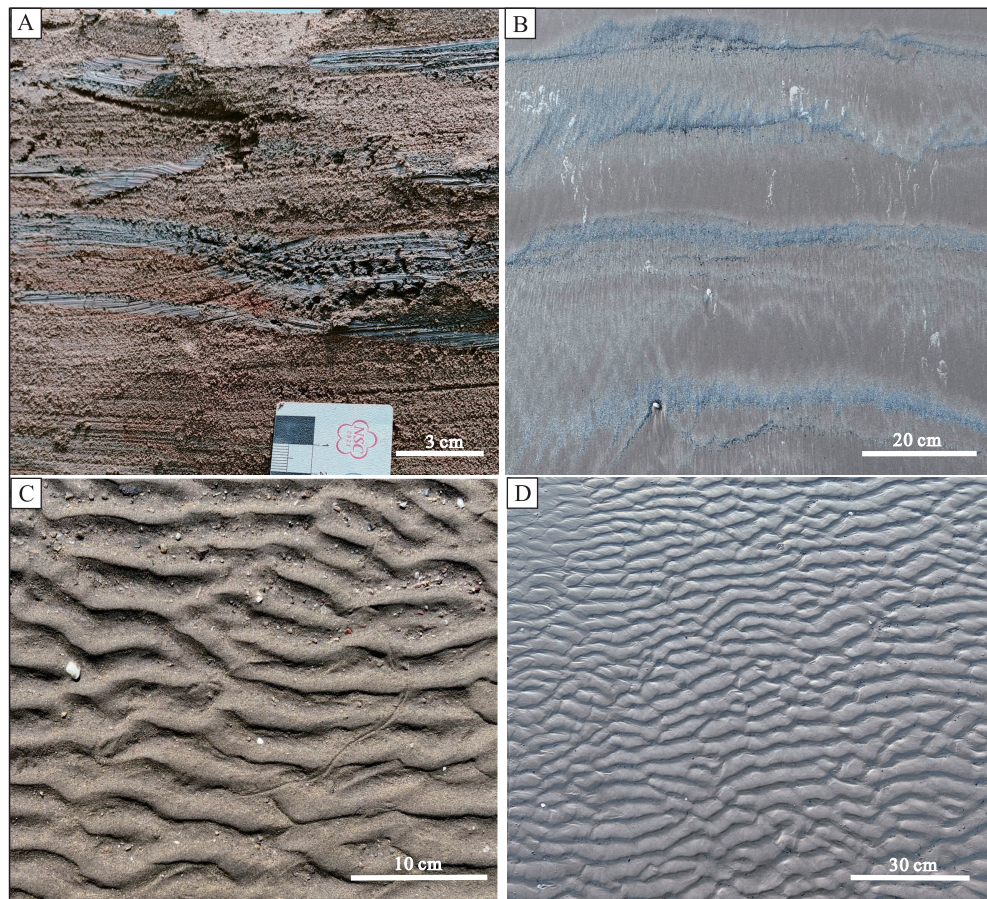
Table 1 Salinity, grain size, crab species and submerged burrow densities and bioturbation rates at sampling sites in the Pearl River Delta Plain (crabs were not observed or identified at some sampling sites)

采样点	沉积描述	盐度 /‰	粒度 /φ	螃蟹种类	潜穴平均直径 / cm	潜穴密度 / 个 · m ⁻²	潜穴平均横截面积 / cm ²	生物扰动率 *
1	粗粉沙	0.91	4.499		0.802	140	0.51	0.71
2	粗粉沙	0.36	5.910	无齿东方相手蟹、字纹弓蟹				
3	粗粉沙	0.19	4.818	无齿东方相手蟹	0.835	170	0.55	0.93
4	细沙	1.01	2.127					
5	细粉沙	0.36	6.372	无齿东方相手蟹	3.070	36	7.40	2.66
6	粗粉沙	1.23	4.381					
7	细粉沙	0.15	6.981	无齿东方相手蟹	1.292	53	1.31	0.69
8	粗粉沙	0.31	4.758	无齿东方相手蟹	0.608	207	0.29	0.60
9	细粉沙	1.19	6.431	丽彩拟瘦招潮	0.855	185	0.57	1.06
10	细粉沙	0.21	7.426		0.529	242	0.22	0.53
11	粗粉沙	0.25	5.715	字纹弓蟹	0.587	300	0.27	0.81
12	细沙	14.53	2.078					
13	细粉沙	4.67	6.334	丽彩拟瘦招潮	0.943	56	0.70	0.39
14	粗粉沙	0.12	5.516	大陆拟相手蟹	0.812	182	0.52	0.94
15	细粉沙	0.10	6.682					
16	细粉沙	2.70	6.794	长足长方蟹	0.452	352	0.16	0.56
17	细粉沙	1.86	6.668	无齿东方相手蟹				
18	细粉沙	0.24	7.150	无齿东方相手蟹				
19	细沙	0.11	3.371					
20	细粉沙	0.14	6.603					
21	细粉沙	0.14	6.492		0.497	181	0.19	0.35
22	细粉沙	0.10	6.553		0.608	91	0.29	0.26
23	细沙	0.18	2.602		0.455	176	0.16	0.29
24	细粉沙	0.18	6.380	无齿东方相手蟹	0.497	188	0.19	0.36
25	细沙	0.12	3.615					
26	细粉沙	0.12	7.081		1.096	176	0.94	1.66
27	细粉沙	0.12	7.573					
28	粗粉沙	0.89	5.234					
29	细粉沙	0.66	7.078					
30	细粉沙	0.08	6.914	无齿东方相手蟹	0.432	306	0.15	0.45
31	细粉沙	0.09	6.685	无齿东方相手蟹				
32	细粉沙	0.09	6.862	无齿东方相手蟹	1.182	83	1.10	0.91
33	细粉沙	0.10	7.023	无齿东方相手蟹				
34	细粉沙	0.10	6.990					
35	细粉沙	0.09	6.509	无齿东方相手蟹				
36	粗粉沙	0.12	4.931	无齿东方相手蟹				
37	细粉沙	0.12	7.124	无齿东方相手蟹				
38	细粉沙	0.09	6.631	无齿东方相手蟹				
39	细粉沙	0.10	7.142	无齿东方相手蟹	0.612	133	0.29	0.39
40	细粉沙	0.10	7.160	无齿东方相手蟹				
41	细粉沙	0.12	6.554	无齿东方相手蟹				
42	细粉沙	0.11	7.197					
43	细粉沙	0.11	6.744		0.691	262	0.38	0.98
44	细粉沙	0.21	7.368	无齿东方相手蟹				
45	细粉沙	0.12	6.940	无齿东方相手蟹				

续表 1

采样点	沉积描述	盐度 /‰	粒度 /φ	螃蟹种类	潜穴平均 直径/cm	潜穴密度 /个·m ⁻²	潜穴平均横截 面积/cm ²	生物扰动率*
46	细粉沙	1.77	7.070	无齿东方相手蟹				
47	细粉沙	0.40	7.085					
48	细粉沙	0.12	6.495					
49	细粉沙	0.12	6.722		0.440	320	0.15	0.49
50	细粉沙	0.11	7.008					
51	粗粉沙	0.11	5.752		0.396	145	0.12	0.18
52	细粉沙	0.11	7.199		0.613	104	0.30	0.31
53	细粉沙	0.10	6.637		0.582	276	0.27	0.73
54	细粉沙	0.11	6.758					
55	细粉沙	0.11	6.633		0.561	166	0.25	0.41
56	细粉沙	0.18	7.186					
57	细粉沙	0.11	6.690	无齿东方相手蟹				
58	细粉沙	0.10	7.185		0.614	74	0.30	0.22
59	细粉沙	0.19	6.819	无齿东方相手蟹	0.857	144	0.58	0.83
60	粗粉沙	0.10	5.656					
61	细粉沙	0.10	7.163					
62	细粉沙	0.11	6.575					
63	细粉沙	0.11	7.089					
64	细粉沙	0.10	7.052					
65	细粉沙	0.11	6.438					
66	细粉沙	0.10	6.719					
67	细粉沙	0.10	6.956					
68	细粉沙	1.15	6.879	中华东方相手蟹				
69	细粉沙	1.49	7.163	中华东方相手蟹				
70	细粉沙	0.09	6.999					
71	细沙	0.03	2.948					
72	细沙	0.03	3.490					
73	粗粉沙	0.08	4.291					
74	细粉沙	0.06	6.764					
75	粗粉沙	0.08	5.768					
76	粗粉沙	0.08	5.674					
77	细粉沙	0.07	6.164					
78	细粉沙	0.09	6.117	无齿东方相手蟹				
79	细粉沙	0.07	6.086	无齿东方相手蟹				
80	细粉沙	0.07	6.650					
81	细粉沙	0.10	6.617					
82	细粉沙	0.08	6.444	无齿东方相手蟹				
83	粗粉沙	0.10	5.360	无齿东方相手蟹				
84	细粉沙	0.15	6.335	无齿东方相手蟹	0.274	850	0.06	0.50
85	细粉沙	0.12	6.385					
86	细粉沙	0.09	1.985					
87	细粉沙	0.11	6.087					
88	细粉沙	0.08	7.163					
89	粗粉沙	0.12	5.191	无齿东方相手蟹				
90	细粉沙	0.10	6.463					
91	细粉沙	0.12	6.402					
92	细沙	0.10	3.260					

* 生物扰动率=(潜穴密度*潜穴平均横截面积)/100。



A—平行层理；B—浪成波痕；C—干涉波痕；D—纵向波痕

图 3 珠江三角洲平原沉积构造特征

Fig. 3 Sedimentary structure characteristics of the Pearl River Delta Plain

10~20 cm, 轴的末端多为 J 形(图 4-E) 和 I 形(图 4-G), 也有的为 2 个轴在基底合二为一形成 Y 形(图 4-H) 潜穴。图 4-I 为 CT 扫描的三维图像, 潜穴直径为 0.7 cm, 深度为 7 cm, 近乎垂直向下无分支, 由上到下呈细—粗—细的结构。该类潜穴主要用来躲避捕食和缓冲恶劣的环境条件, 如较大的波浪作用、较高的温度等 (Rodríguez-Tovar *et al.*, 2014), 偶尔也会用于繁殖和食物储存等 (Kristensen, 2008)。

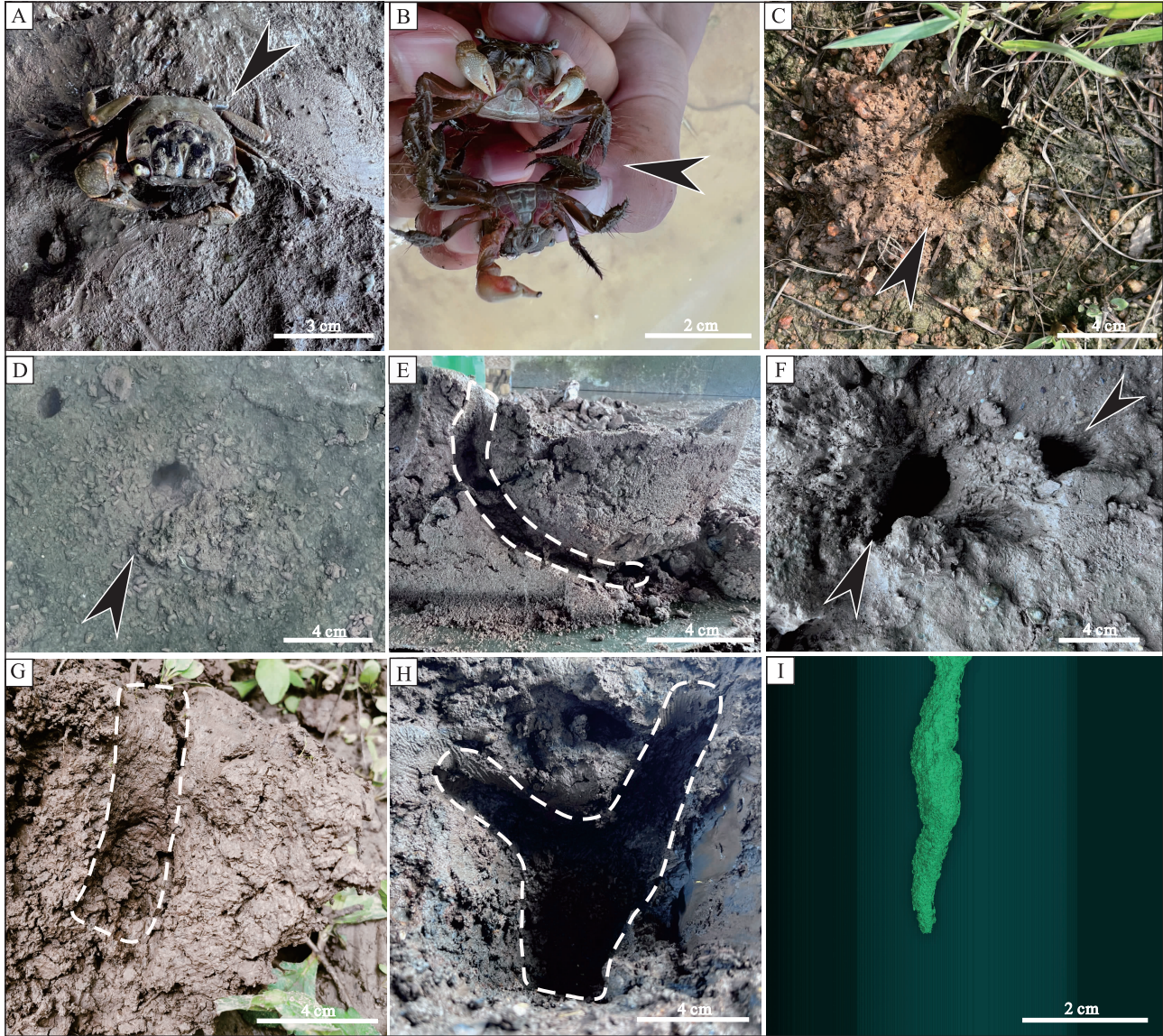
4.2 中华东方相手蟹 *Orisarma sinense*

中华东方相手蟹(图 5-A) 属方蟹科相手蟹属, 主要出现的点位在采样点 68、69。观察记录发现, 该类蟹主要栖息于受潮汐影响较小的高潮带至潮上带的红树林或沼泽泥地, 沉积底质多为泥质, 生活环境植被较多, 擅长掘穴与攀爬, 随处可见潜穴口被掘出的泥浆(图 5-B)。潜穴主要建造

在泥地里, 偏好于有遮蔽物的地方(图 5-C), 潜穴口周围一般有生长的植物延伸出的树枝遮盖在潜穴口上方, 使其能够很好地保护自己免受天敌的侵扰。中华东方相手蟹白天喜欢停留在潜穴口(图 5-D), 但一受到惊扰立马钻回潜穴中, 在外活动的个体若感觉到危险时, 除了会躲进潜穴, 也会爬到树上来躲避敌害。

4.3 字纹弓蟹 *Varuna litterata*

字纹弓蟹属弓蟹科弓蟹亚科属, 主要出现的点位在采样点 2、11。观察记录发现, 该类蟹喜欢居住在近河口地区, 生活的沉积底质主要为泥或碎石, 其会攀附在水中的石块或植物上, 遇到危险会快速游走。字纹弓蟹的食物以沉积物中的有机物为主, 进食时通常会以自己的潜穴为中心, 在潜穴口周围遗留下一圈进食后的泥球颗粒(图 6-A), 颗粒形状较为统一, 为直径 0.5~1 cm 的近圆形颗



A—无齿东方相手蟹；B—无齿东方相手蟹性别图，上位雌蟹，下为雄蟹；C—近圆形居住潜穴，潜穴口周围有挖出的泥浆；D—螃蟹排泄迹，为细条状物；E—J形潜穴；F—Y形潜穴口；G—I形潜穴；H—与图F相对应的Y形潜穴；I—CT扫描潜穴，近乎垂直的I形

图 4 无齿东方相手蟹营造遗迹

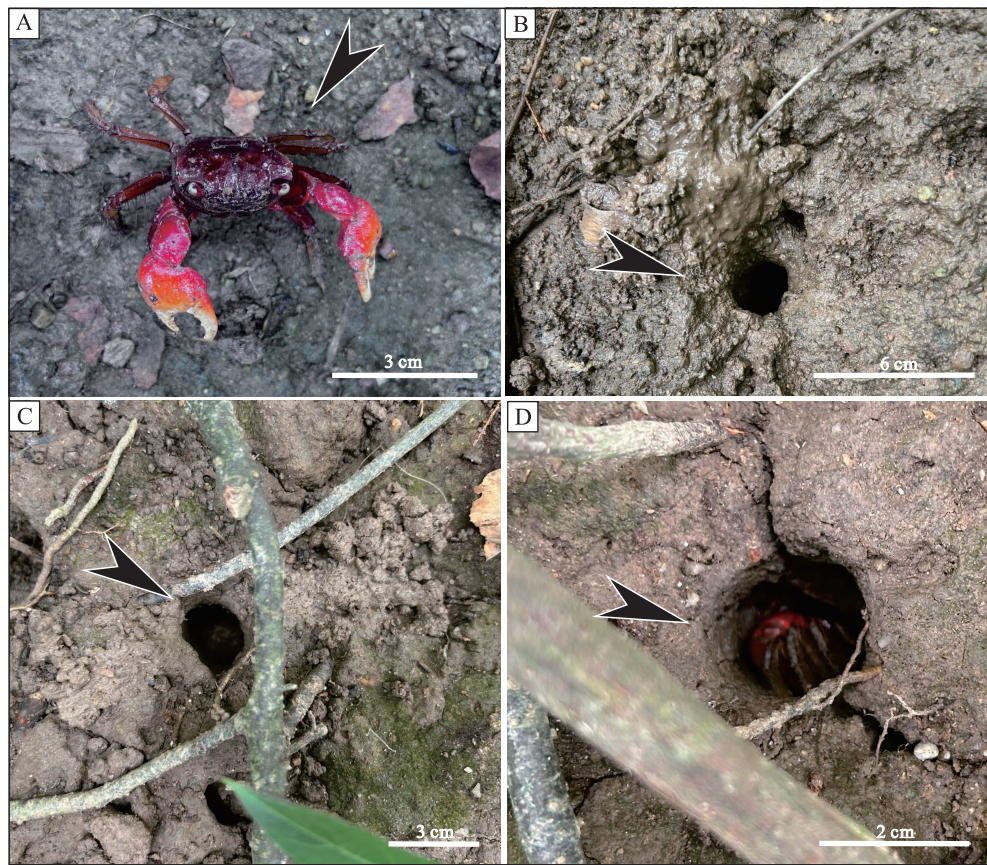
Fig. 4 Construction traces by *Orisarma dehaani*

粒。其建造的潜穴从地层表面来看除了近圆形潜穴口外还有不少围墙形潜穴口(图 6-B)，潜穴的直径在 0.5~2 cm 之间，潜穴离地面的垂直高度为 1~3 cm，潜穴内部形状以 I 形(图 6-C)和 J 形(图 6-D)为主，少有分支，内壁较为光滑，内里无填充物。

4.4 大陆拟相手蟹 *Parasesarma continentale*

大陆拟相手蟹为方蟹总科相手蟹科属，主要发现于采样点 14。观察记录发现，大陆拟相手蟹主要

栖息于河口附近的红树林泥滩，主要以红树叶子和泥土中的有机质为食，生活的沉积底质为泥质。该类蟹主要穴居于潮间带。该点位大陆拟相手蟹的扰动较为丰富，潜穴分布较为密集(图 7-B)，潜穴密度为 182 个/m²，而且潜穴口附近多有螃蟹进食后遗留下的泥球。潜穴口大多为近圆形，直径较小，平均直径 0.81 cm；潜穴内部形态多为简单的 I 形(图 7-A)，没有分支，较为笔直；潜穴略深(5~15 cm)，如图 7-A 中有 1 只大陆拟相手蟹在潜穴中休息，而这种深度的潜穴能够很好地保护它们不受



A—中华东方相手蟹；B—中华东方相手蟹潜穴遗迹；C—有树枝遮挡的潜穴；D—在潜穴口观望的中华东方相手蟹

图 5 中华东方相手蟹营造遗迹

Fig. 5 Construction traces by *Orisarma sinense*

侵扰和天敌的伤害。

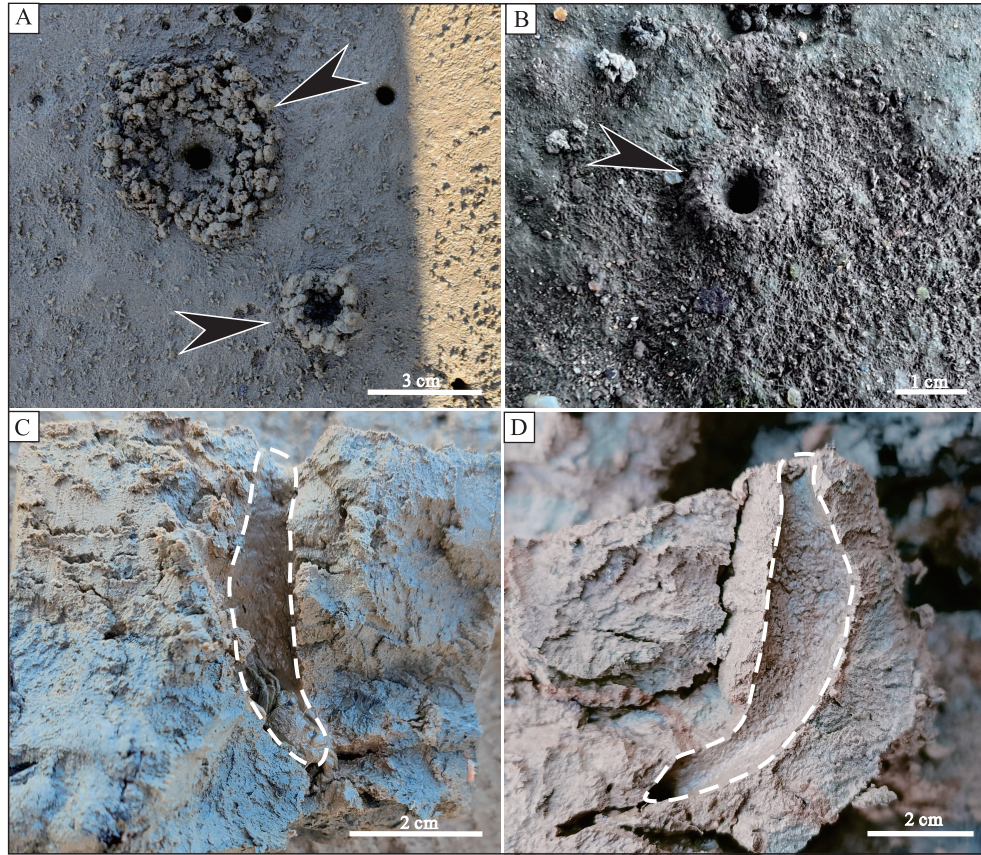
4.5 长足长方蟹 *Metaplax longipes*

长足长方蟹为方蟹总科弓蟹科属，在观察点位 16 发现。其主要栖息于潮间带裸滩上，退潮后出来活动，喜欢盘踞在自己的潜穴边沿，对淤泥质自然岸线有很强的依赖性，可见生活的主要沉积底质为泥质。在采样点发现到的层面遗迹主要为长足长方蟹的层内居住潜穴，潜穴口多为斜行(图 8-A)，常伴有水坑(图 8-B)，说明长足长方蟹喜欢生活在有水且沉积底质松软的环境中。长足长方蟹生活密集地区的潜穴密度达到 352 个/m²，生物扰动丰富。此外，还发现有大量的长足长方蟹的足辙迹，多为点坑形、无规律运动(图 8-C)，有的潜穴口周围有成排整齐的足印(图 8-D)。

4.6 丽彩拟瘦招潮 *Paraleptuca splendida*

丽彩拟瘦招潮又称“西瓜蟹”，为沙蟹总科

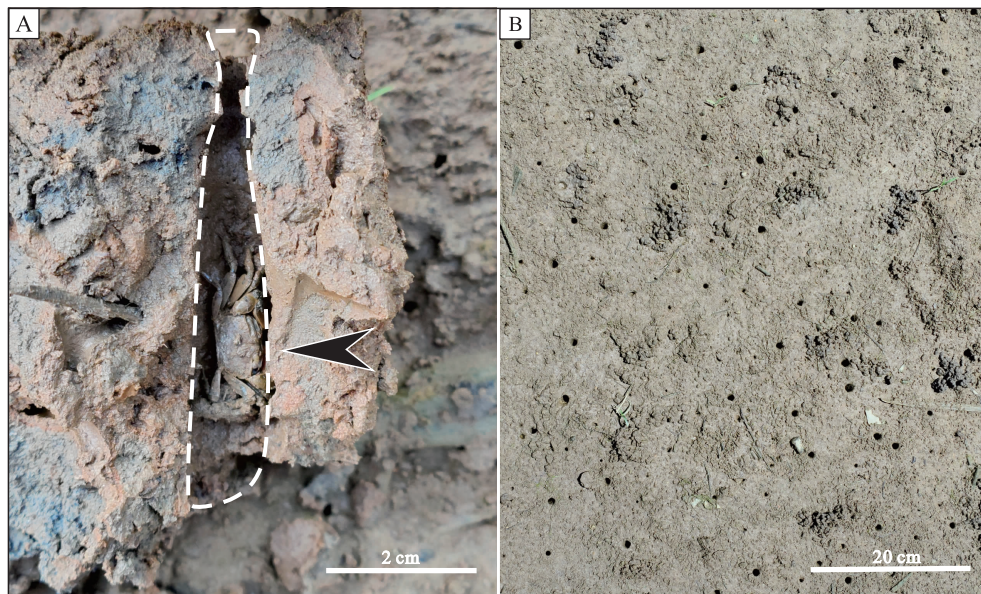
丑招潮亚科属，采样点位 9、13 均有发现。观察记录发现，该类螃蟹主要穴居于高潮带至中潮带的砂质滩涂上，沉积底质主要为砂质泥。丽彩拟瘦招潮属群居动物，生物扰动较为明显，喜掘穴，潜穴密度在 2 个采样点分别为 185 个/m² 和 56 个/m²，平均潜穴直径为 0.86 cm 和 0.94 cm。潜穴口形状多样，有圆形和烟囱形(图 9-B) 等，其中烟囱形的潜穴距离水平地面的垂直高度为 1~4 cm，不仅较为美观，而且又有避难和吸引异性的作用。潜穴内部形态多为简单的 I 形(图 9-C)，比较垂直，内壁光滑。在研究点位还发现有较多的觅食迹和足辙迹，其中觅食迹主要是丽彩拟瘦招潮摄取泥沙中的有机物后排泄出的泥球，环绕在潜穴口周围(图 9-A)，而足辙迹(图 9-D)为螃蟹在潜穴口周围行走时留下的划痕，形状为点坑状，主要遗留在潜穴口附近，说明丽彩拟瘦招潮平时的活动范围较小。



A—觅食迹，在潜穴口围成一圈的近圆形泥球颗粒；B—围墙形潜穴口，离地层表面 1~3 cm；C—I 形潜穴；D—J 形潜穴

图 6 字纹弓蟹营造遗迹

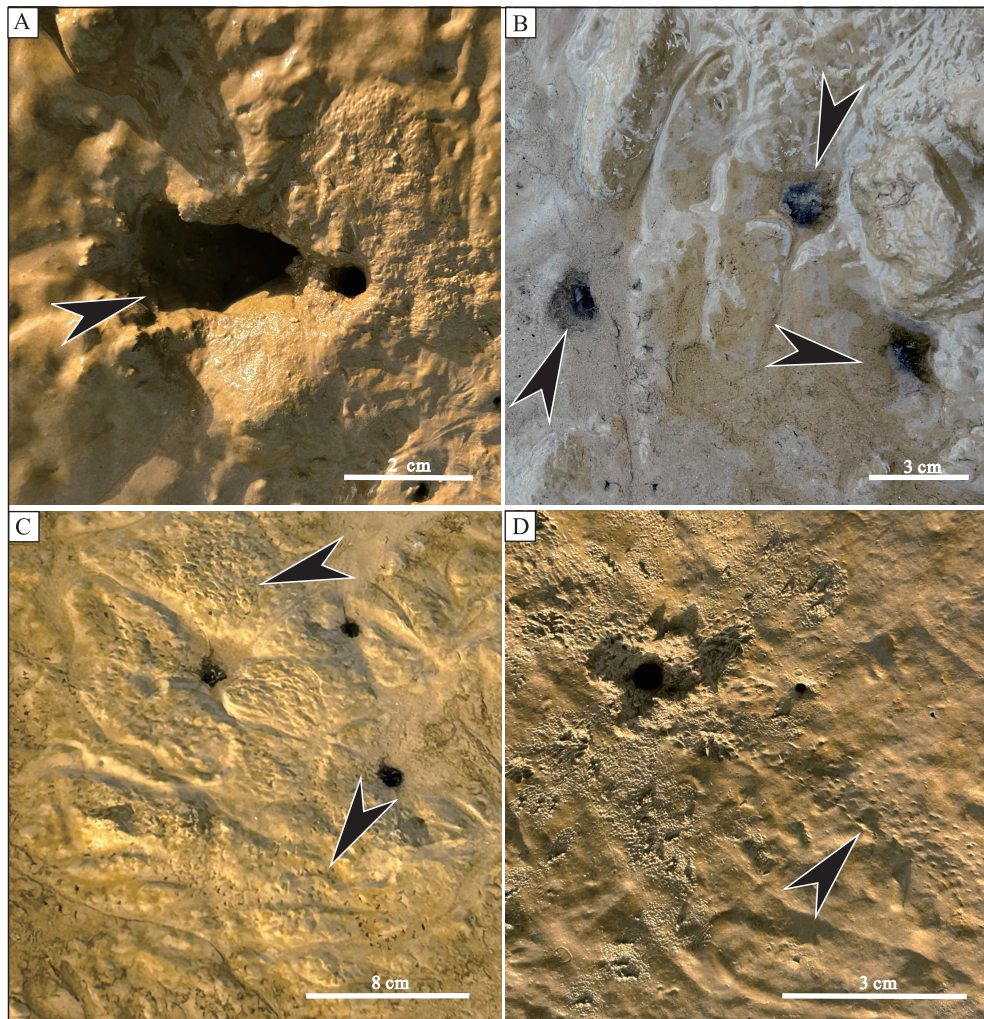
Fig. 6 Construction traces by *Varuna litterata*



A—I 形潜穴，里边居住着大陆拟相手蟹；B—分布密集的潜穴及螃蟹进食过的泥球颗粒

图 7 大陆拟相手蟹营造遗迹

Fig. 7 Construction traces by *Parasarma continentale*



A—斜向潜穴；B—伴有水坑的潜穴；C—点坑状的无规则足辙迹；D—成排足辙迹

图 8 长足长方蟹营造遗迹

Fig. 8 Construction traces by *Metaplex longipe*

5 讨论

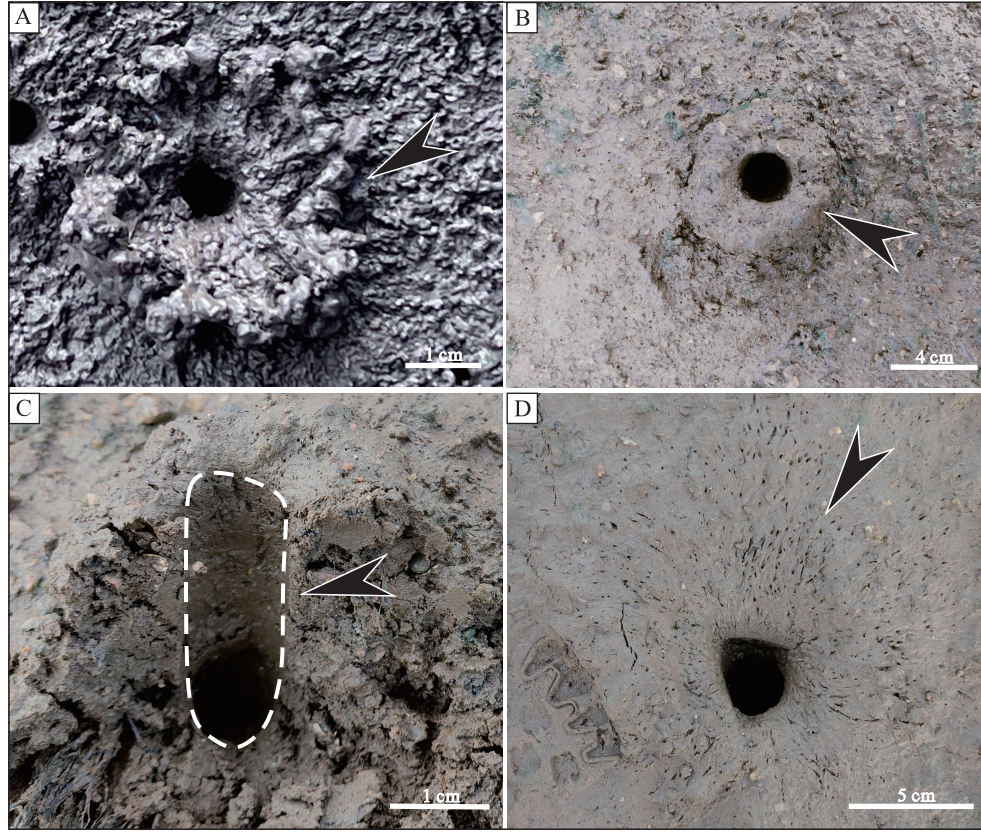
5.1 螃蟹遗迹的组成与分布特征

5.1.1 螃蟹遗迹的分布特征

通过对珠江三角洲平原地区螃蟹遗迹的调查发现，螃蟹遗迹主要分布在河口、滨海湿地和淡水生态系统中(图 10)。由于河口地区经常受到海水和淡水的交汇影响，多为淡咸水环境(0.5‰~16‰)，加上潮汐的涨落，具有丰富的生态资源，给螃蟹提供了适宜的生存环境(罗秉征, 1992; 崔伟中, 2004)，所以河口地区的螃蟹分异度及其遗迹密度较高，生物扰动程度最高。该地区生活的螃蟹包括无齿东方相手蟹、丽彩拟瘦招潮、长足长方蟹、大陆拟相手蟹，它们营造的潜穴平均直径为

0.76 cm，密度为 183 个/m²。在淡水生态系统的分流河道中，盐度较低且相对稳定在 0.5‰以下，生物遗迹丰度较河口地区少。该环境的优势种为无齿东方相手蟹，分布范围较广，反映出其更适应珠江三角洲地区的特定环境条件(梁伟诺等, 2023)；潜穴平均密度为 199 个/m²，潜穴形态相较于其他物种更为多样，有 I 形、J 形和 Y 形等。

此外，水动力条件和粒度对沉积速率具有关键的控制作用，三者共同影响着螃蟹的栖息环境(王翠等, 2023)。研究区内沉积物大多为细粉沙(图 11)，水动力较弱，沉积速率低，生物遗迹丰度和分异度较高。沉积物颗粒大小适中，具有一定的孔隙，能够保证水体的交换和氧气的供应(杨洪等, 2004)，有利于螃蟹进行潜穴的建造和日常生



A—觅食迹；B—烟囱状潜穴，离地层表面1~4 cm；C—I形潜穴；D—潜穴周围密集的点坑状足痕迹
图9 丽彩拟瘦招潮营造遗迹

Fig. 9 Construction traces by *Paraleptuca splendida*

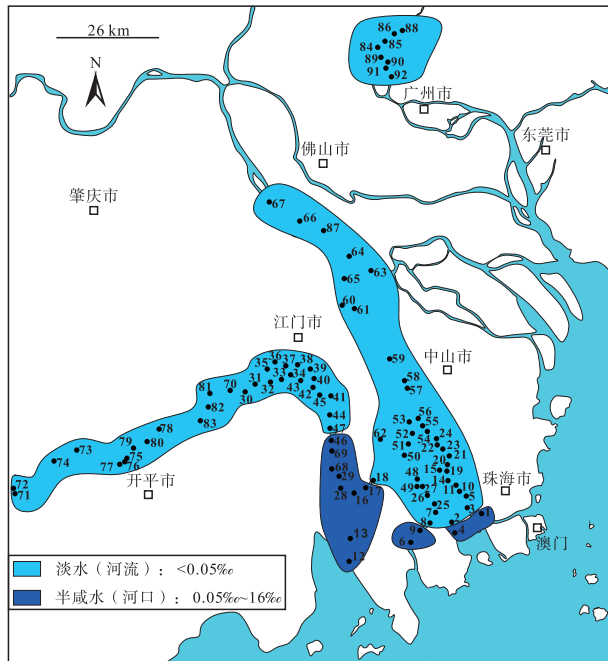


图10 珠江三角洲平原盐度分布图

Fig. 10 Salinity distribution in the Pearl River Delta Plain

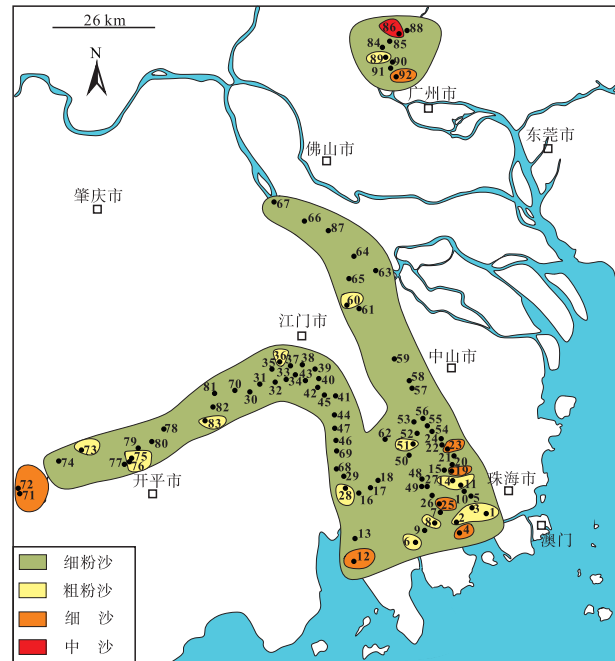


图11 珠江三角洲平原粒度分布图

Fig. 11 Grain size distribution in the Pearl River Delta Plain

活的摄食，从而能够更好地生活（徐永健等，2015）。

5.1.2 螃蟹遗迹的组成特征

由于栖息地环境的不同，螃蟹遗迹的物种存在一定的差异。研究发现，珠江三角洲平原地区的主要螃蟹遗迹由无齿东方相手蟹、中华相手蟹和丽彩拟瘦招潮等的爬行迹、觅食迹、排泄迹、穴居构造等所构成（图 12）。这些物种对于维持该地区的生态平衡具有重要作用，通过食物链的调节、底栖生物的控制等方式，维持着生态系统的稳定性（Li *et al.*, 2013; 陈顺洋等，2014）。首先，螃蟹作为食物链的捕食者，通过捕食一些底栖动物或植物，防止它们的数量过度增长，避免造成生态系统的不稳定（陈顺洋等，2014）；其次，螃蟹的一些掘穴、摄食和排泄的行为，可能改变一些底栖生物的生活环境，从而对生态系统的稳定起着调节作用（陈晓旋等，2018）。

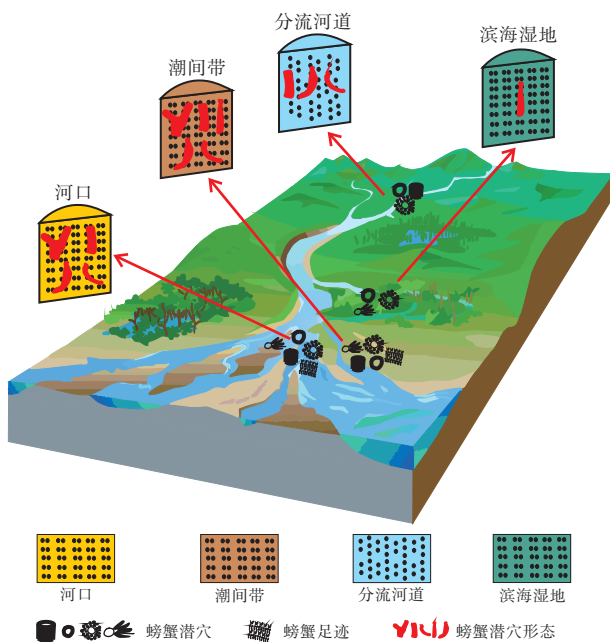
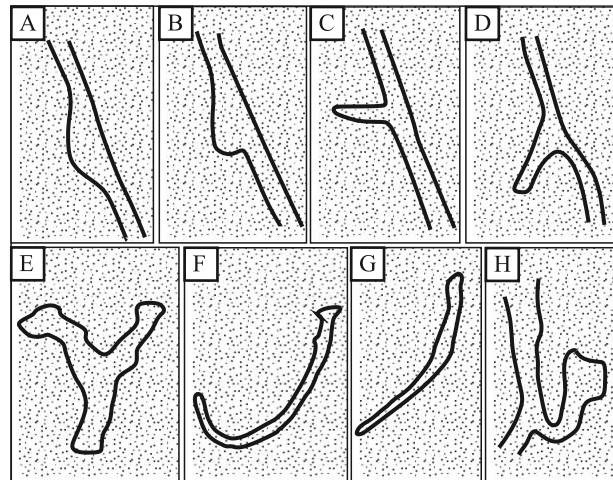


图 12 珠江三角洲平原螃蟹遗迹分布三维模式

Fig. 12 Three-dimensional model of crab construction traces distribution in the Pearl River Delta Plain

5.2 与古遗迹化石的类比

研究发现螃蟹遗迹与遗迹化石 *Psilonichnus* 在形态上相类似。*Psilonichnus* 遗迹化石通常是由螃蟹或虾的穴居活动形成，常呈现为直径较小的圆形或卵形潜穴口，潜穴形态为垂直到倾斜、直到微弯、Y 形、U 形、无衬里的圆柱状（图 13），直径



A-D—*Psilonichnus quietis* 的 4 种不同形状的隆起, A 为半圆形隆起, B 为半三角形隆起, C 为鞋形隆起, D 为腿形隆起, 根据 Myint (2001, 图 5, 第 7 页) 重新绘制; E—*Psilonichnus tubiformis* 的 Y 形潜穴, 根据 Neto de Carvalho (2016, 图 3-c, 第 5 页) 重新绘制; F—*Psilonichnus upsilon* 的 J 形潜穴, 根据 Frey (1984, 图 9, 第 344 页) 重新绘制; G—*Psilonichnus* 显示向下变细, 根据 Humphreys 和 Balson (1988, 图 3, 第 170 页) 重新绘制; H—*Psilonichnus* 的分枝, 根据 Doyle 等 (2021, 图 2-b, 第 4 页) 重新绘制。均未按比例绘制

图 13 *Psilonichnus* 的不同形状

Fig. 13 Various shapes of *Psilonichnus*

3~5 cm, 最大观察长度超过 200 cm (Wang *et al.*, 2019; 王媛媛等, 2020; Doyle *et al.*, 2021)。遗迹化石 *Psilonichnus* 不同遗迹种的形态、所处的沉积底层和环境也不尽相同, 为了精细对比研究该遗迹化石, 将不同种类螃蟹的遗迹与遗迹化石 *Psilonichnus* 的不同遗迹属进行类比分析。与 *Psilonichnus* 化石潜穴的形态（图 13）比较表明, I 形的潜穴与 *Psilonichnus quietis* (Pemberton and Jones, 1988) 比较相像, 而复杂分支的潜穴与 *Psilonichnus tubiformis* (Nesbitt and Campbell, 2002) 相似, 且前者的 I 形潜穴是一个典型的短暂居住结构, 而复杂的分支潜穴具有多种用途, 最重要的是用来居住和躲避捕食。图 13 中描述的 Y 形潜穴与 *Parmaichnus stironensis* (Peresler and Uchman, 2009) 相似, 但是在 Y 形潜穴的上部没有观察到隆起, 而这是鉴定 *Parmaichnus stironensis* 的典型特征 (Peresler and Uchman, 2009)。*Psilonichnus* 在全球的分布比较广泛, 存在于多种沉积环境中, 典型的环境有海滩、沙丘、冲积扇和潮上平原, 被认为是浅海到陆地的重要指示标志 (Neto de Carvalho, 2016; Wang *et al.*, 2019)。螃蟹遗迹的潜穴口大多

表 2 珠江三角洲平原螃蟹遗迹与类似遗迹化石的形态特征和参数对比
Table 2 Comparison of morphological features and parameters between crab traces
in the Pearl River Delta Plain and similar trace fossils

遗迹和遗迹化石	珠江三角洲平原螃蟹遗迹	<i>Psilonichnus tubiformis</i>	<i>Psilonichnus upsilon</i>	<i>Psilonichnus lutimuratus</i>	<i>Psilonichnus upsilon</i>
基本描述和重要特征	简单的 I 形、J 形和 Y 形潜穴；横截面为圆形，少有分枝；潜穴无衬里，内部光滑；密度较大	上部为垂直的 Y 形或 U 形，向下延伸为直管或略微弯曲的管状；圆柱形潜穴，外侧有短的分枝	略微倾斜，几乎不分枝；J 形或 Y 形潜穴；无衬里的潜穴	横截面呈圆形；基底渐细且稍弯曲；光滑的内外壁；少有侧枝或没有侧枝；密集、重叠、不规则	略倾斜；主要为 I 形，极少的 Y 形；无衬里的圆柱形潜穴；整个结构在一个垂直平面内
测量	长度/cm	5~15	最大超 200	多为 120	80
参数	直径/cm	0.4~3.5	3~5	2.5~4.5	0.5~3
沉积环境特征	沙和粉沙；近海岸线潮间带、分流河道	粉砂质黏土岩、粉砂岩；潮间带、低能环境	中到细粒的钙钛矿（碳酸盐岩）；前滨上部至后滨，海滩上部至沙丘下部，潮间带	砂岩和泥岩；开阔的、以风暴和波浪为主的河口点条状沉积物	中砂岩；前滨到后滨；很可能是后滨
资料来源	本文	Fürsich, 1981; Frey <i>et al.</i> , 1984; Gingras <i>et al.</i> , 2000	Frey <i>et al.</i> , 1984; Gingras <i>et al.</i> , 2000	Nesbit and Campbell, 2002	Olszewska-Nejbert <i>et al.</i> , 2020

都是圆形、椭圆形，潜穴形状多表现为 I 形、J 形和 Y 形，潜穴存在的位置相邻陆地和海洋，因此螃蟹遗迹整体的形态特征和所处的沉积环境与 *Psilonichnus* 遗迹化石相似（Neto de Carvalho, 2016），螃蟹属于遗迹化石 *Psilonichnus* 造迹生物的一种，这为遗迹化石 *Psilonichnus* 的研究提供了现代实证基础。

5.3 与古遗迹相的类比

珠江三角洲平原沉积环境中现代生物螃蟹营造的遗迹与遗迹化石 *Psilonichnus* 在沉积环境和形态上相似，而该遗迹化石存在于 *Glossifungites* 相、*Psilonichnus* 相和 *Skolithos* 相中。秘鲁亚马逊河的中新世沉积物 *Glossifungites* 相发现大量的 *Psilonichnus* 遗迹化石。地质历史时期已发现多种 *Psilonichnus* 遗迹化石（表 2），如 *Psilonichnus tubiformis*、*Psilonichnus quietis*、*Psilonichnus lutimuratus*（Frey *et al.*, 1984）和 *Psilonichnus upsilon*（Tiwari *et al.*, 2013），分别存在于 *Psilonichnus* 相和 *Skolithos* 相。*Glossifungites* 相的典型底层环境是固结的滨海和潮下带停积面，主要由脱水的、粘结的泥质沉积物组成，痕迹类型以居住迹为主，包括垂直柱状、U 形和枝形潜穴等。*Psilonichnus* 相沉积于潮上至潮间带的位置，常见于前滨最上部、海滩滨后和潮上平原的沉积环境，沉积底质为沙、泥，组成该遗迹相

的主要遗迹属是一种垂直、柱状的居住潜穴（胡斌等，1997）。*Skolithos* 相典型环境为潮间带下部到潮下浅水，沉积底质由干净的、分选良好的沙组成，遗迹呈垂直管状（王翠，2022）。研究区内螃蟹生活的环境与 *Glossifungites* 相和 *Psilonichnus* 相相似，因此不能简单地用已建立的遗迹相定义。

6 结论

珠江三角洲平原地区螃蟹遗迹主要分布在咸淡水交汇处的河口地区，主要螃蟹种类为方蟹总科相手蟹属无齿相手蟹、中华相手蟹和沙蟹总科沙蟹属丽彩拟瘦招潮等，层面遗迹有它们营造的潜穴、爬行迹、觅食迹和排泄迹等，层内遗迹主要为螃蟹的居住迹，形状大多为 I 形和 J 形，还有少量的 Y 形。螃蟹遗迹的形态特征和所处的沉积环境与遗迹化石 *Psilonichnus* 相像，可认为螃蟹是遗迹化石 *Psilonichnus* 的造迹生物之一，为遗迹化石 *Psilonichnus* 的研究提供了现代实证基础。对珠江三角洲平原地区不同种类螃蟹遗迹的研究发现，其组成和分布特征与现代沉积环境之间具有明显的相应关系，这为类比研究古三角洲地区的沉积环境、沉积底层性质和水动力条件等生态环境因素提供现代遗迹学资料。

致谢 中国科学院南京土壤研究所陈捷老师对

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老师对三维重构提供了帮助, 审稿人给本文提供诸多宝贵的修改意见及启发性的建议, 在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- 陈顺洋, 陈光程, 陈彬, 叶勇, 马志远. 2014. 红树林湿地相手蟹科动物摄食生态研究进展. 生态学报, 34(19): 5349-5359. [Chen S Y, Chen G C, Chen B, Ye Y, Ma Z Y. 2014. Feeding ecology of sesamid crabs in mangroves. *Acta Ecologica Sinica*, 34(19): 5349-5359]
- 陈晓旋, 陈淑云, 曾从盛, 王维奇. 2018. 螃蟹对闽江河口湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征影响. 环境科学学报, 38(3): 1179-1188. [Chen X X, Chen S Y, Zeng C S, Wang W Q. 2018. Effects of crabs on soil carbon, nitrogen, phosphorus concentration and ecological stoichiometry in Minjiang River estuarine wetlands. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38(3): 1179-1188]
- 陈耀泰. 1992. 珠江口现代沉积速率与沉积环境. 中山大学学报(自然科学版), 31(2): 100-107. [Chen Y T. 1992. Modern sedimentary velocity and sedimentary environment in the Pearl River Mouth. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 31(2): 100-107]
- 程明豪. 1984. 西江河口(磨刀门)沉积环境分析. 地理研究, 3(1): 51-65. [Cheng M H. 1984. A study of the sedimentary environment in Modaomen estuary, the main river-mouth of Xijiang (west river). *Geographical Research*, 3(1): 51-65]
- 崔伟中. 2004. 珠江河口水环境时空变异对河口生态系统的影响. 水科学进展, 15(4): 472-478. [Cui W Z. 2004. Impact of temporal and spatial variation of water environment on ecosystem of the Pearl River estuary. *Advances in Water Science*, 15(4): 472-478]
- 戴仕宝, 杨世伦, 蔡爱民. 2007. 51年来珠江流域输沙量的变化. 地理学报, 62(5): 545-554. [Dai S B, Yang S L, Cai A M. 2007. Variation of sediment discharge of the Pearl River Basin from 1955 to 2005. *Acta Geographica Sinica*, 62(5): 545-554]
- 龚一鸣, 胡斌, 卢宗盛, 齐永安, 张国成. 2009. 中国遗迹化石研究 80 年. 古生物学报, 48(3): 322-337. [Gong Y M, Hu B, Lu Z S, Qi Y A, Zhang G C. 2009. Study of trace fossils in the past eighty years in China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48(3): 322-337]
- 胡斌, 王冠忠, 齐永安. 1997. 遗迹学理论与应用. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社. [Hu B, Wang G Z, Qi Y A. 1997. *Theory and Application of Trace Science*. Jiangsu Xuzhou: China University of Mining and Technology Press]
- 胡斌, 王媛媛, 张璐, 单婷婷. 2012. 黄河中下游焦作区段现代边滩沉积中的生物遗迹. 古地理学报, 14(5): 628-638. [Hu B, Wang Y Y, Zhang L, Shan T T. 2012. Biogenic traces in modern point bar deposits of the Middle-Lower Reaches of Yellow River in Jiaozuo area, Henan Province. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 14(5): 628-638]
- 胡斌, 齐永安, 宋慧波, 牛永斌, 张立军, 郑伟, 王长征. 2021. 中国遗迹学研究十年进展. 古地理学报, 23(2): 284-320. [Hu B, Qi Y A, Song H B, Niu Y B, Zhang L J, Zheng W, Wang C Z. 2021. Research progress of Chinese ichnology in recent ten years. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(2): 284-320]
- 梁伟诺, 何克宏, 胡亮. 2023. 珠江口淇澳岛潮间带蟹类(十足目: 短尾下目)物种多样性与分布. 海洋学报, 45(11): 76-87. [Liang W N, He K H, Hu L. 2023. Intertidal crabs (Decapoda: Brachyura) species diversity and distribution in Qi'ao Island, Zhujiang River Estuary. *Haiyang Xuebao*, 45(11): 76-87]
- 龙云作, 霍春兰, 司桂贤, 杨聿容, 朱卫勤, 石瑞祥, 牛作民, 马道修, 徐明广, 周青伟, 张光威, 蓝先洪. 1985. 对珠江三角洲沉积特征和沉积模式的一些认识. 海洋地质与第四纪地质, 5(4): 49-57. [Long Y Z, Huo C L, Si G X, Yang Y R, Zhu W Q, Shi R X, Niu Z M, Ma D X, Xu M G, Zhou Q W, Zhang G W, Lan X H. 1985. On sedimentary characteristics and model of Zhujiang River Delta. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 5(4): 49-57]
- 龙云作, 霍春兰, 杨胜雄. 1989. 珠江三角洲现代沉积环境及沉积特征. 海洋地质与第四纪地质, 9(4): 15-27. [Long Z Y, Huo C L, Yang S X. 1989. Modern sedimentary environment and characteristics of the Zhujiang River Delta. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 9(4): 15-27]
- 罗秉征. 1992. 河口及近海的生态特点与渔业资源. 长江流域资源与环境, 1(1): 24-30. [Luo B Z. 1992. Ecological characteristics and fishery resources of the Yangtze River Estuary and adjacent sea. *Resources and Environment in the Yangtze Valley*, 1(1): 24-30]
- 潘保柱, 王兆印, 何雪宝. 2011. 西江大型底栖动物群落特征研究. 水生生物学报, 35(5): 851-856. [Pan B Z, Wang Z Y, He X B. 2011. Studies on assemblage characteristics of macrozoobenthos in the west river. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 35(5): 851-856]
- 宋慧波, 于会新, 王海邻, 范代读, 胡斌, 王芳. 2014. 杭州湾庵东浅滩现代沉积物中的生物遗迹. 古地理学报, 16(5): 703-714. [Song H B, Yu H X, Wang H L, Fan D D, Hu B, Wang F. 2014. Biogenic traces in modern shoal deposits of Andong area, Hangzhou Bay. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 16(5): 703-714]
- 苏亚芳. 1992. 谈珠江三角洲的形成与发展. 遥感信息, (3): 29-30. [Su Y F. 1992. Talking about the formation and development of the Pearl River Delta. *Remote Sensing Information*, (3): 29-30]
- 王翠. 2022. 黄河三角洲潮坪环境中现代生物遗迹的组成和分布特征. 河南理工大学硕士学位论文. [Wang C. 2022. *The composition and distribution characteristics of biogenic sedimentary structures in tidal flat of the Yellow River Delta*. Masteral dissertation of Henan Polytechnic University]
- 王翠, 王媛媛, 胡斌. 2023. 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. 沉积学报, 41(3): 748-762. [Wang C, Wang Y Y, Hu B. 2023. The response relationship between biogenic structures and physicochemical stresses of the Yellow River deltaic tidal flat. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(3): 748-762]
- 王海邻, 张彬, 宋慧波, 王长征, 胡斌, 张立军. 2022. 滦河三角洲潮坪环境现代生物遗迹组合及其分布特征. 古地理学报, 24(6):

- 1179-1192. [Wang H L, Zhang B, Song H B, Wang C Z, Hu B, Zhang L J. 2022. Assemblages of lebensspuren and distribution characteristics in tidal flat of Luanhe delta. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(6): 1179-1192]
- 王建华,曹玲珑,王晓静,杨小强,阳杰,苏志华. 2009. 珠江三角洲万顷沙地区晚第四纪沉积相与古环境演变. *海洋地质与第四纪地质*, 29(6): 35-41. [Wang J H, Cao L L, Wang X J, Yang X Q, Yang J, Su Z H. 2009. Evolution of sedimentary facies and paleoenvironment during the late Quaternary in Wanqingsha area of the Pearl River delta. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(6): 35-41]
- 王金庆. 2008. 长江口盐沼优势蟹类的生境选择与生态系统工程师效应. 复旦大学博士学位论文. [Wang J Q. 2008. Habitat selection and ecosystem engineering effects of dominant burrowing crabs in salt marshes in the Yangtze River Estuary, China. Doctoral dissertation of Fudan University]
- 王珊珊. 2008. 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. 中国海洋大学博士学位论文. [Wang S S. 2008. Modern sedimentary environment and environmental evolution since Late Pleistocene for the Pearl River Delta and intracoastal estuary and sea area. Doctoral dissertation of Ocean University of China]
- 王媛媛,王学芹,胡斌. 2019. 黄河三角洲潮坪环境中现代生物遗迹组成与分布特征. *沉积学报*, 37(6): 1244-1257. [Wang Y Y, Wang X Q, Hu B. 2019. The composition and distribution characteristics of biogenic sedimentary structures in tidal flat of Yellow River Delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(6): 1244-1257]
- 王媛媛,王翠,王学芹,胡斌,王长征. 2020. X射线计算机断层扫描技术在生物遗迹识别方面的应用. *现代地质*, 34(6): 1221-1229. [Wang Y Y, Wang C, Wang X Q, Hi B, Wang C Z. 2020. Application of X-ray computed tomography in identification of biogenic structures. *Geoscience*, 34(6): 1221-1229]
- 王媛媛,勾松林,张国成. 2024. 现代珠江三角洲前缘生物遗迹组成与分布特征. *沉积学报*, 42(5): 1512-1529. [Wang Y Y, Gou S L, Zhang G C. 2024. The composition and distribution characteristics of biological traces in the Pearl River Delta front. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(5): 1512-1529]
- 韦惺,吴超羽. 2018. 珠江三角洲沉积体与河网干流河道的形成发育. *海洋学报*, 40(7): 66-78. [Wei X, Wu C Y. 2018. The formation and development of the deposition bodies and main channels in the Zhujiang River Delta. *Haiyang Xuebao*, 40(7): 66-78]
- 吴超羽,韦惺. 2021. 从溺谷湾到三角洲: 现代珠江三角洲形成演变研究辨析. *海洋学报*, 43(1): 1-26. [Wu C Y, Wei X. 2021. From drowned valley to delta: discrimination and analysis on issues of the formation and evolution of the Zhujiang River Delta. *Haiyang Xuebao*, 43(1): 1-26]
- 吴洁,刘春莲,张素青,杨婷婷,殷鉴. 2014. 珠江三角洲东部晚第四纪微体动物群的古环境意义. *中山大学学报(自然科学版)*, 53(6): 45-52. [Wu J, Liu C L, Zhang S Q, Yang T T, Yin J. 2014. Palaeoenvironmental significance of Late Quaternary microfau-
- nas in the eastern Pearl River Delta. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 53(6): 45-52]
- 吴月琴,刘春莲,杨小强,黄毅,殷鉴,张恺. 2019. 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. *海洋地质与第四纪地质*, 39(2): 31-43. [Wu Y Q, Liu C L, Yang X Q, Hang Y, Yin J, Zhang K. 2019. Holocene microfaunal records in the central Pearl River Delta and implications for palaeoenvironmental changes. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(2): 31-43]
- 徐永健,申屠基康,丁张妮. 2015. 砂粒粒径与砂层厚度对单体筐培养殖系统中三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)幼蟹摄食行为与生长特性的影响研究. *海洋与湖沼*, 46(1): 233-239. [Xu Y J, Shentu J K, Ding Z N. 2015. Grain size and thickness of sand bottom affect the growth of swimming crab *Portunus trituberculatus* in single-crab basket-culture system. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 46(1): 233-239]
- 杨洪,易朝路,邢阳平,谢平. 2004. 武汉东湖沉积物孔隙度与含水量. *湖泊科学*, 16(1): 68-72. [Yang H, Yi C L, Xing Y P, Xie P. 2004. Porosity and water content of sediments in Lake Donghu, Wuhan. *Journal of Lake Sciences*, 16(1): 68-72]
- 殷鉴,刘春莲,吴洁,黄毅,吴月琴. 2016. 珠江三角洲中部晚更新世以来的有孔虫记录与古环境演化. *古地理学报*, 18(4): 677-690. [Yin J, Liu C L, Wu J, Huang Y, Wu Y Q. 2016. Foraminiferal records and palaeoenvironmental changes since the Late Pleistocene in central Pearl River Delta. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(4): 677-690]
- 袁菲,何用,许劭婧. 2022. 近期珠江三角洲地形演变特征及趋势. *泥沙研究*, 47(1): 59-64. [Yuan F, He Y, Xu J J. 2022. Recent topographical evolution characteristics and trend of the Pearl River Delta. *Journal of Sediment Research*, 47(1): 59-64]
- 张光威. 1988. 珠江口现代沉积环境的沉积物特征. *海洋地质动态*, 4(2): 4-6. [Zhang G W. 1988. Sediment characteristics of modern sedimentary environments in the Pearl River Estuary. *Marine Geology Frontiers*, 4(2): 4-6]
- 张光威,马道修,徐明广,周青伟,蓝先洪. 1988. 珠江口现代沉积物构造特征及其沉积环境. *海洋地质与第四纪地质*, 8(3): 71-83. [Zhang G W, Ma D X, Xu M G, Zhou Q W, Lan X H. 1988. Sedimentary environments and structures of modern sediments in the Mouth of Zhujiang River. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 8(3): 71-83]
- 张绍轩,汤永杰,郑翠美,陈震,郑卓. 2020. 珠江三角洲全新世海-陆沉积模式转换及其年代. *海洋地质与第四纪地质*, 40(5): 107-117. [Zhang S X, Tang Y J, Zheng C M, Chen Z, Zheng Z. 2020. Holocene sedimentary environment transform and onset time of Pearl River Delta progradation. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(5): 107-117]
- 张蔚,严以新,郑金海,吴宏旭. 2010. 珠江三角洲年际潮差长期变化趋势. *水科学进展*, 21(1): 77-83. [Zhang W, Yan Y X, Zheng J H, Wu H X. 2010. Interannual tidal range trend in Pearl River Delta. *Advances in Water Science*, 21(1): 77-83]
- 赵焕庭. 1982. 珠江三角洲的形成和发展. *海洋学报(中文版)*,

- 4(5) : 595–607. [Zhao H T. 1982. The formation and development of the Pearl River Delta. *Acta Oceanologica Sinica*, 4(5) : 595–607]
- 赵焕庭. 1983. 珠江三角洲的水文特征. *热带海洋*, 2(2) : 108–117. [Zhao H T. 1983. Hydrological characteristics of the Zhujiang (Pearl River) Delta. *Tropic Oceanology*, 2(2) : 108–117]
- 赵焕庭. 1984. 珠江河口演变的基本过程. *热带海洋*, 3(4) : 1–10. [Zhao H T. 1984. The general evolution process of Zhujiang (Pearl River) Mouth. *Tropic Oceanology*, 3(4) : 1–10]
- 赵焕庭. 1989. 珠江河口的水文和泥沙特征. *热带地理*, 9(3) : 201–212. [Zhao H T. 1989. Hydrological and sedimentary characteristics of the Pearl River estuary. *Tropical Geography*, 9(3) : 201–212]
- Doyle E, Orr P, Murray J. 2021. The earliest occurrence of the ichnogenus *Psilonichnus*: a new record from the Mississippian of the west of Ireland. *Ichnos*, 28(3) : 208–216.
- Frey R W, Curran H A, Pemberton S G. 1984. Tracemaking activities of crabs and their environmental significance: the ichnogenus *Psilonichnus*. *Journal of Paleontology*, 58(2) : 333–350.
- Fürsich F T. 1981. Invertebrate trace fossils from the Upper Jurassic of Portugal. *Comunicações do Serviço Geológico de Portugal*, 67(2) : 153–168.
- Gingras M K, Hubbard S M, Pemberton S G, Saunders T. 2000. The significance of Pleistocene *psilonichnus* at Willapa Bay. *Washington. Palaios*, 15 : 142–151.
- Humphreys B, Balson P S. 1988. *Psilonichnus* (Fürsich) in late Pliocene subtidal marine sands of eastern England. *Journal of Paleontology*, 62(2) : 168–172.
- Kristensen E. 2008. Mangrove crabs as ecosystem engineers: with emphasis on sediment processes. *Journal of Sea Research*, 59 : 30–43.
- Li G, Yan W, Zhong L F. 2016. Element geochemistry of offshore sediments in the northwestern South China Sea and the dispersal of Pearl River sediments. *Progress in Oceanography*, 141 : 17–29.
- Li Y, Wang W, Ma X Z, Zhang Y J. 2013. Effect of rice-crab culture system on zoobenthos diversity in paddy field. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 21(7) : 838–843.
- Myint M. 2001. *Psilonichnus quietis* isp. nov. from the Eocene Iwaki formation, Shiramizu group, Joban coal field, Japan. *Ichnos*, 8(1) : 1–14.
- Nesbitt E A, Campbell K A. 2002. A new *Psilonichnus* ichnospecies attributed to mud-shrimp *Upogebia* in estuarine settings. *Journal of Paleontology*, 76(5) : 892–901.
- Neto de Carvalho C. 2016. *Psilonichnus* Fürsich, 1981 in its type-locality (Praia do Salgado, western Portugal). *Comunicações Geológicas*, 103 : 13–21.
- Olszewska-Nejbert D, Kotowski J, Nejbert K. 2020. *Psilonichnus upsilon* Frey, Curran and Pemberton, 1984 burrows and their environmental significance in transgressive Albian (Lower Cretaceous) sands of Głanów-Stroniczki, Cracow Upland, southern Poland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 538 : 109388.
- Pervesler P, Uchman A. 2009. A new Y-shaped trace fossil attributed to Upogebiid Crustaceans from Early Pleistocene of Italy. *Acta Palaeontologica Polonica*, 54(1) : 135–142.
- Pemberton S G, Jones B. 1988. Ichnology of the Pleistocene ironshore formation, Grand Cayman island, British west Indies. *Journal of Paleontology*, 62(4) : 495–505.
- Rodríguez-Tovar F J, Seike K, Allen Curran H. 2014. Characteristics, distribution patterns, and implications for ichnology of modern burrows of *Uca* (*Leptuca*) *speciosa*, San Salvador Island, Bahamas. *Journal of Crustacean Biology*, 34(5) : 565–572.
- Tiwari R P, Rajkonwar C, Patel S J. 2013. *Funalichnus bhubani* isp. nov. from Bhuban Formation, Surma Group (Lower-Middle Miocene) of Aizawl, Mizoram, India. *PLoS One*, 8(10) : e77839.
- Wang Y Y, Wang X Q, Hu B, Luo M. 2019. Tomographic reconstructions of crab burrows from deltaic tidal flat: contribution to palaeoecology of decapod trace fossils in coastal settings. *Palaeoworld*, 28(4) : 514–524.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 陈吉涛)