

文章编号: 1671-1505(2025)03-0660-07 DOI:10.7605/gdxb.2025.069

遗迹学研究进展与前沿： 第 5 届国际遗迹学大会综述*

李 妲 宋慧波 张立军 牛永斌 王 敏 代明月

河南理工大学资源环境学院, 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室, 河南焦作 454003

摘要 第 5 届国际遗迹学大会于 2024 年 4 月 14 日至 19 日在巴西佛罗里达诺波利斯顺利召开。此次会议共收集摘要 128 篇, 结合口头报告、展板、野外地质考察及专题讨论等, 认为遗迹学研究的新进展及其应用主要集中于 5 个方面: (1) 基于遗迹化石的精细研究及遗迹相分析、生物造迹行为的探究, 来恢复古环境和古生态; (2) 多学科交叉的遗迹化石定量分析; (3) 南美洲等地区四足动物及恐龙脚印的研究; (4) 生物扰动对油气储集层的改造; (5) 新遗迹学技术得到进一步的发展。

关键词 遗迹学 遗迹化石 新遗迹学 第 5 届国际遗迹学大会

第一作者简介 李妲, 女, 1984 年生, 副教授, 博士, 主要从事沉积学、古生物学、遗迹学等研究工作。
E-mail: lida@hpu.edu.cn。

通讯作者简介 宋慧波, 女, 1979 年生, 教授, 博士, 主要从事古生物学、遗迹学和沉积学等研究工作。
E-mail: songhuibo2005@hpu.edu.cn。

中图分类号: Q911.28 文献标志码: A

Progress and frontiers in ichnology research: a review of the 5th International Congress on Ichnology

LI Da SONG Huibo ZHANG Lijun NIU Yongbin WANG Min DAI Mingyue

*Institute of Resources and Environment, Key Laboratory of Biogenic Traces & Sedimentary Minerals of Henan Province,
Henan Polytechnic University, Henan Jiaozuo 454003, China*

Abstract The 5th International Congress on Ichnology was successfully held in Florianopolis, Brazil, from April 14th to 19th, 2024. A total of 128 abstracts were collected. Based on oral presentations, posters, geological field work, and thematic discussions, new progress and applications of ichnology theory were mainly concentrated on five aspects: (1) traditional ichnology, detailed study of trace fossils and ichnotaxonomy, exploring behavior of the trace-makers, and reconstructing palaeoenvironments and ecosystems; (2) quantitative analysis of trace fossils by interdisciplinary approaches; (3) research on tetrapod animals and dinosaur footprints in South America; (4) biological disturbance in the transforma-

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42472058), 河南省高等学校青年骨干教师培养计划 (编号: 2024GGJS035), 河南理工大学 2024 安全学科双一流创建项目 (编号: AQ20240723) 共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 42472058), the Young Backbone Teacher Training Program of Higher Education Institutions in Henan Province (No. 2024GGJS035), and the 2024 Double First-Class Creation Project in Safety Science at Henan Polytechnic University (No. AQ20240723)]

收稿日期: 2024-12-16 改回日期: 2025-03-10

tion of the oil and gas reservoir; (5) further development of neoichnology technologies.

Key words ichnology, ichnofossil, neoichnology, the 5th International Congress on Ichnology

About the first author LI Da, born in 1984, is an associate professor with a Ph.D. degree. Her primary research focuses on sedimentology, paleontology, ichnology, and related disciplines. E-mail: lida@hpu.edu.cn.

About the corresponding author SONG Huibo, born in 1979, is a professor with a Ph.D. degree. Her primary research focuses on paleontology, ichnology, sedimentology and related disciplines. E-mail: songhuibo2005@hpu.edu.cn.

第 5 届国际遗迹学大会于 2024 年 4 月 14 日至 19 日在巴西佛罗里达诺波利斯召开。来自巴西、加拿大、美国、中国、波兰等 21 个国家和地区的 200 多位遗迹学研究学者参加了此次会议，包括国际著名遗迹学家 Uchman A, Wetzel A, Gingras M, Buatois L, Leonardi G, Mángano G 等。会议内容共分为 2024 年 4 月 13 日和 14 日举办的短期课程和研讨会（工作坊）、口头报告、展板展示、野外地质考察 4 个部分。其中，为参会学生们提供的短期课程共有 4 个专题：(1) 微生物—底质相互作用的遗迹；(2) 遗迹埋藏学；(3) 古土壤遗迹学；(4) X 射线在遗迹组构和生物扰动构造分析中的应用。该次会议开展了多次野外地质考察：会前考察了白垩系 Botucatu 组脊椎动物遗迹化石记录；会议期间对大西洋海滩上的现代生物遗迹进行了考察；会后实地考察了巴西南部帕南盆地古生代沉积物中的无脊椎动物遗迹化石、晚古生代沉积物中的 *Cruziana* 遗迹相以及泥盆系 *Rosselia* 和 *Zoophycos* 遗迹组构。

第 5 届国际遗迹学大会共收到来自 21 个国家和地区的 128 篇摘要，其中来自南美地区的摘要 51 篇（巴西 30 篇，阿根廷 21 篇），美国 20 篇，加拿大 12 篇，中国 9 篇，智利和印度各 6 篇，西班牙 5 篇等。综合会议摘要主要内容，结合展板介绍，认为此次会议内容主要包括 5 个方面：(1) 基于遗迹化石的精细研究及遗迹相分析、造迹生物造迹行为的探究，来恢复古环境和古生态；(2) 多学科交叉的遗迹化石定量分析；(3) 南美等地区四足动物及恐龙脚印的研究；(4) 生物扰动对油气储集层的改造；(5) 新遗迹学技术得到进一步的发展。

国际遗迹学大会每 4 年举办 1 次，是遗迹学领域影响力最大的国际学术活动。河南理工大学遗迹学团队共 6 位学者（宋慧波、牛永斌、张立军教授，王敏、李姐和代明月副教授）参加了此次会

议并在会上做口头报告，是参会中国学者人数最多的单位。基于河南理工大学遗迹学团队的积极申请和详细汇报，第 6 届国际遗迹学大会定于 2028 年在中国举办。

1 古环境和古生态恢复

基于遗迹化石的精细研究、形态功能及遗迹相分析来恢复古环境、古生态，一直深受遗迹学家的重视。Gingras 等（2024）认为将遗迹学与潮间带相模式相结合，可以更全面地理解潮间带生态系统的动态变化，因此他依据加拿大 Alberta 省下白垩统麦克默里组、西班牙始新统巴罗尼亚组、美国威拉帕湾更新统，以及吉伦特河口来自亚极地、温带、亚热带和热带的现代和古代沉积实例，提出了一个解释框架：(1) 大多数浅海环境显示出较低的生物扰动强度，但半咸水至潮间带生物扰动强度则趋于增加；(2) 小到中等潮汐环境中，潮下带生物扰动程度稀少—中等，而现代类似物却表现出非常高的生物扰动强度，均匀穴居分布，这是由于高密度生物种群和缓慢的沉积速率共同作用的结果；(3) 潮间带生物扰动程度非常高，且泥质潮间带生物扰动（BI=3~6）较沙质环境（BI=0~4）较高；(4) 在海湾和河口，潮汐流、浅水、潮间带暴露区域，以及靠近丰富的藻类和浮游生物活动的地方，潜穴柱内沉积物表面和沉积物内部食物丰富，可划分为 2 种营养方式的潜穴类型。上述模式在现代和古代潮坪环境中都是一致的。

许多学者把研究焦点集中在生物灭绝事件与遗迹化石之间的相互关系方面。如 Buatois 等（2024）通过对生物灭绝事件与海洋底栖生物的遗迹学研究，认为二叠纪末的生物大灭绝是目前唯一显示混合层崩塌证据的事件，且由于混合层的消失，沉积物—水界限附近的生物多样性得到持续地保存；生

物大灭绝事件期间, 遗迹学多样性减少, 生物扰动程度降低、扰动深度减小、潜穴尺寸减小, 大灭绝事件后地层中以简单构造的遗迹化石为主, 食沉积生物所造遗迹分类群得以优先保存, 浅海生态系统也发生选择性的灭绝。Luo 等 (2024) 通过对上二叠统一中三叠统遗迹化石的阶层结构、多样性、分异度的长期变化进行分析, 认为全球上二叠统一中三叠统遗迹化石多样性和分异度仍然保持在二叠纪末生物大灭绝时的水平, 相对对低纬度而言, 中高纬度地区的生物对灭绝环境的适应能力更强, 生物恢复速度更快。Li 等 (2024) 通过对寒武纪小型生物灭绝事件 (ROECE 事件) 附近遗迹化石生态系统工程值和生态空间模式的研究, 推断出在 ROECE 事件前后遗迹化石的变化规律: 在 ROECE 事件之前, 馒头组一段中生物对沉积物的扰动多停留在沉积物的浅表层, 扰动程度总体较低, 但在局部沉积物层面上扰动程度较高; 在 ROECE 事件之后, 馒头组二段下部沉积时期后生动物数量减少, 微生物席广泛发育, 生物对沉积物的扰动表现为后生动物与微生物席的相互作用; 馒头组二段上部及馒头组三段沉积时期, 后生动物数量大量增多, 具有高生态系统工程影响值的 *Thalassinoides* 与 *Treptichnus* 大量发育, 其对沉积物扰动深度和广度的迅速增加, 创造出大量新的生态空间, 从而促进了建造者功能群的转变。

MacEachern 等 (2024) 提出在三角洲和边缘海等复杂的海洋环境中, 受物理能量、沉积速率、浑浊度、盐度、氧化作用和底栖生物群落时空变化的影响, 生物扰动强度以及遗迹化石的组成和分布发生显著变化, 形成新的与以往 Seilacher 建立在相对稳定环境上的海相遗迹相不同的遗迹相特征。结合三角洲和边缘海海陆系统等沉积动力学环境, 建立 3 种新的浅海环境 Seilacherian 遗迹相: *Phycosiphon*, *Rosselia* 和 *Teichichnus*。3 种新的遗迹相中, 遗迹化石组合变化明显, 潜穴零星分布, 生物扰动强度范围较大, 分别用于表征前三角洲相、三角洲前缘相和半咸水近岸相的物理化学条件和由此产生的生物—沉积物关系 (Gingras *et al.*, 2024)。

综上所述, 学者普遍对二叠纪末大灭绝事件中的遗迹化石研究颇为重视, 而对其他大灭绝事件, 如奥陶纪末、泥盆纪末和三叠纪末以及其他

较低级别的灭绝事件, 相对来说关注较少。同样, 对物种大灭绝中陆相遗迹学特征的研究, 也没有达到与海洋环境相同的程度。因此, 后期可以对除二叠纪末生物大灭绝之外的其他生物灭绝事件中的遗迹化石响应以及陆相物种大灭绝的遗迹学特征研究倾注较多关注。此外, 在较为复杂的动力学环境中, 可能出现与以往提出的遗迹相模式存在明显差异的遗迹化石组合, 因此研究时需要结合当时的沉积环境、物理能量、沉积速率、浑浊度、盐度、氧化作用和底栖生物群落时空变化的影响进行综合分析。

2 多学科交叉的遗迹化石定量分析

近年来, 遗迹学研究越来越多地体现出多学科交叉的发展趋势, 这充分说明多学科交叉的遗迹学分析将是今后遗迹学创新发展的趋势。

埃迪卡拉系—寒武系界面附近发育大量简单的水平遗迹化石, 其平滑度显著增加, 表明出现了明显的解剖学和行为学创新, 但该现象在以前的研究中并没有被量化。Wang 等 (2024) 依据流体力学方法提出了新的定量指标, 包括光滑度准则、最小归一化曲率半径、归一化曲率峰度和能谱密度等, 用于标定该地层中 *Gordia*、*Helminthopsis*、*Helminthoidichnites* 和 *Cochlichnus* 等化石的平滑度变化。根据这些指标, 将遗迹化石分为非光滑、部分光滑和光滑 3 种类型, 分别对应于随机爬行、滑动和蠕动/波动。埃迪卡拉纪晚期首次大量出现的部分光滑遗迹化石, 为移动的两侧对称动物的活动提供了无可争议的证据, 运动效率、感觉范围和导航能力的增加也可以通过平滑度的不同定义来定量推断。这些指标的使用, 有助于进一步开展遗迹学的定量分析, 为研究新元古代—显生宙过渡早期的生物进化提供独特的视角。

Labandeira 等 (2024) 通过功能性取食群残损类型 (FFG-DT) 系统, 跨越时间、空间和植物组合, 分析了植食动物的起源、昆虫谱系演化、昆虫取食目标和方式的转变等问题, 推测二叠纪大灭绝之后植食性昆虫多样性和强度的变化特征, 探讨植物宿主、植食动物之间的相互作用, 揭示出陆相环境中植食性节肢动物和植物宿主的深时起源和进化 (图 1)。

Uchman 等 (2024) 将遗迹化石应用于旋回地

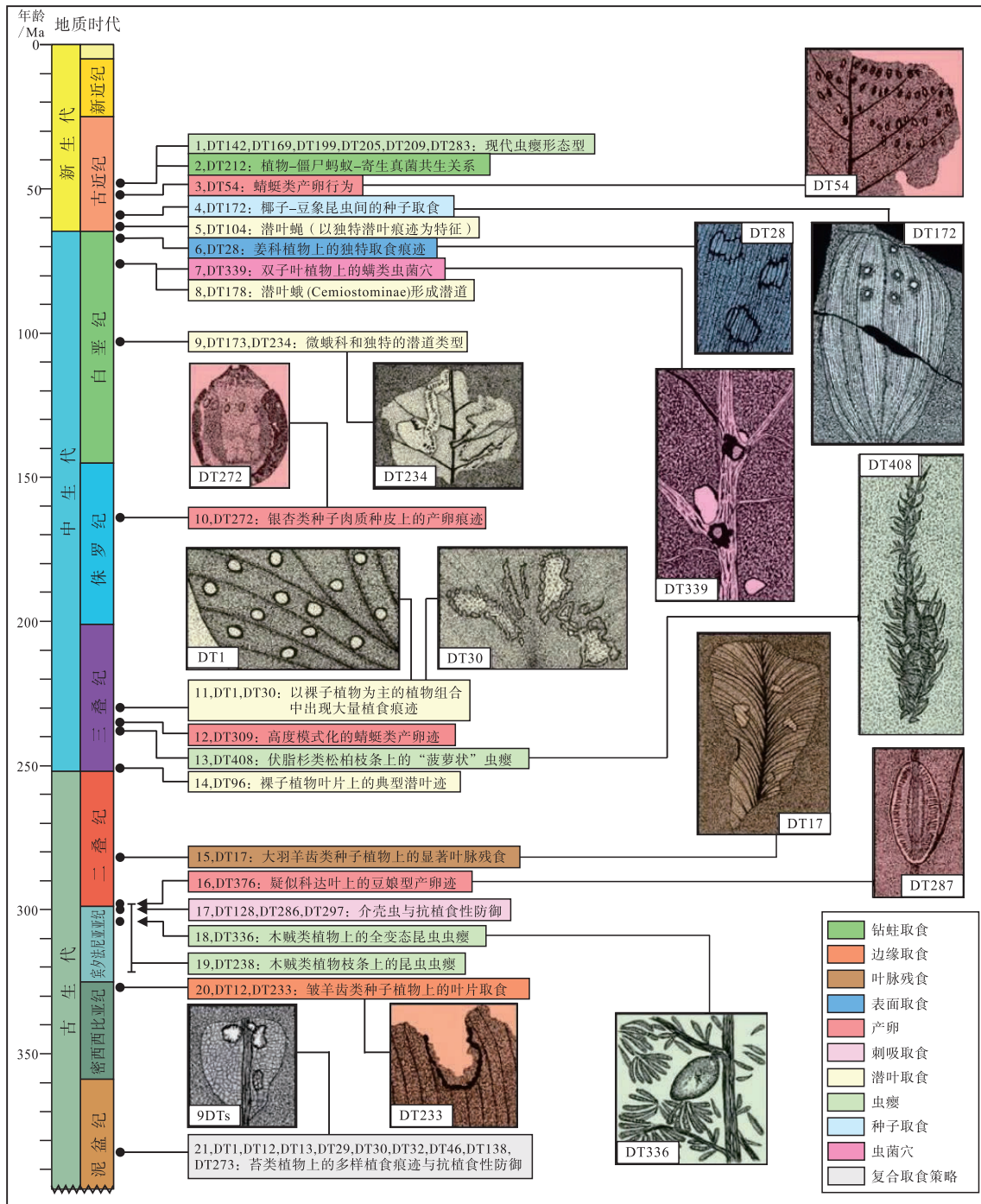


图 1 化石记录中最早出现的植物-节肢动物损伤类型 (DT) (据 Labandeira and Wappler, 2023, 修改)

Fig. 1 Earliest occurrences of plant-arthropod associations in fossil record from damage type (DT) data (modified from Labandeira and Wappler, 2023)

层学解释, 对英国 Cardigan Bay 盆地下侏罗统辛涅缪尔阶 (Sinemurian) -托阿尔阶 (Toarcian) 富含大量生物扰动的半深海钙质泥岩、细粒岩/粉砂岩和次级砾岩/砂岩、粉砂岩/极细粒砂岩/钙质灰岩岩心进行了详细研究, 发现遗迹化石以 *Phycosi-*

phon incertum 为主, 包括 4 种形态, 其是由机会殖民者所造, 为居住和沉积-摄食结构。该段地层中比较常见的遗迹化石为 *Thalassinoides*, *Schaubcylichnus* 和 *Teichichnus* 等。遗迹学和岩性特征表明, 底栖环境的氧化-还原性重复波动可归因于轨道周

期的层次结构(岁差和倾角[4阶]、短偏心率[3阶]、长偏心率[2阶]和地球-火星长期共振[1阶])。基于地球化学时间序列的研究成果(Storm *et al.*, 2020), 认为遗迹学二元数据的光谱分析对轨道信号具有较高的可信度, 从而可以精确地估计该地层中菊石带的分布范围。

遗迹学与其他学科的交叉研究应用, 表明遗迹学研究越来越多地受到各个领域学者的关注, 并且遗迹学的应用范围也越来越广泛。广大学者可以充分地发挥交叉学科优势, 将各相关领域的新方法、新技术应用到遗迹学研究中, 同时也可以将遗迹学信息充分应用到其他领域的研究中, 真正地实现学科交叉, 获取更多有意义的成果。

3 四足动物及恐龙脚印的研究

足迹形态是造迹生物的足部解剖结构与基底之间复杂相互作用的产物, 因此研究足迹化石有助于深入了解古代足迹造迹生物的足部解剖结构, 这对于了解历史上骨骼化石保存十分有限的动物群体的深时间间隔具有重要意义。此次会议上, 南美洲等地区的四足动物及恐龙脚印研究是一个亮点。例如, 巴西库里蒂巴帕拉纳联邦大学地质和古生物学教授、脊椎动物遗迹学家 Leonardi (2024) 在大会上做了主题报告, 讲述其在巴西发现的恐龙足迹化石的心路历程; Andrade-Silva 等 (2024) 对巴西南部南里奥格兰德州 Predebon 露头三叠纪丰富的以舌龙、兽脚类和祖龙(包括恐龙)为代表的足迹化石进行分析, 并对 *Maydwell rhynchosauroides* 进行了化石足迹种属的厘定, 同时他在非洲南部首次发现最古老的晚三叠世至早侏罗世类鸟脚印(Abrahams and Bordy, 2023)——三脚类遗迹属 *Trisauropodiscus*, 证明该类鸟足形态的起源至少有 2.1 亿年的历史。

第 5 届国际遗迹学会议中的四足动物以及恐龙脚印研究成果非常多, 但多来自于南美洲地区的学者, 以巴西地区最多, 所做工作和取得的成果也最为显著。对于该方面的研究, 中国学者以后需要更加关注, 并开展更多的工作。

4 生物扰动对油气储集层的改造

遗迹学最初被用作相分析的工具 (Knaust and

Bromley, 2012; Niu *et al.*, 2020), 近年来多被应用于储集层质量评价、烃源岩识别和预测、约束地层相关性、封闭潜力描述(如不整合面)和盖层分析。生物扰动造成的非均质性可能对油气储集层质量和连通性产生积极或消极的影响, 但影响结果取决于所涉及的潜穴类型, 而这对于确定适合二氧化碳储存的地层同样重要。目前, 显微 CT 扫描、薄片、数字化和小规模建模等手段, 都能够用来对储集层进行有效的遗迹学分析。

基于琼东南盆地 X 射线微 CT 扫描的生物扰动储集层三维孔隙结构和渗流特征的定量表征, Niu 等 (2020, 2022, 2024) 认为生物活动改变了沉积物的原始结构, 导致充填物与母岩沉积物之间的岩石物理性质发生改变, 从而影响储集层性质和流体流动。如 Niu 等 (2024) 根据琼东南盆地三亚组岩心 3 个样品 (S1、S2、S3) 中的 *Ophiomorpha* 含量不同, 利用 X 射线显微镜 (Zeiss Xradia 510 Versa) (XRM) 对岩石样品进行扫描, 基于三维扫描数据建立了三维孔隙结构模型, 揭示出生物扰动储集层的孔隙大小分布不均匀导致其具有较强的非均质特征, 连通孔隙空间的增大对储集层有效渗透率改善具有关键作用。研究结果对分析生物扰动对油气储集层的改造作用、提高研究区油气产量和采收率具有重要意义。

5 新遗迹学技术得到进一步发展

现代遗迹学中的生物沉积物混合或生物扰动是海底环境中生物地球化学循环和垂向沉积物再分布的重要控制因素之一。日本学者 Seike (2024) 分别对温带海滩、临滨和深海海底进行了新遗迹学研究, 发现温带沙滩环境中主要是多毛类 (*Macaronichnus* 的现代对应造迹生物) 和招潮蟹 (*Psilonichnus* 的现代对应造迹生物) 的沉积进食遗迹, 临滨环境中主要是近缘虾潜穴 (*Ophiomorpha* 和 *Parmaichnus*), 其密集分布在水深大于 8 m 的临滨环境, 猬团海胆棘皮动物的潜穴 (*Bichordites* 的现代对应造迹生物) 在海岸也很常见, 而深海海底环境以复杂的几何形态遗迹而闻名, 深海赤刀鱼 *Acanthocephala limbata* 产生具开口潜穴的几何图案。该研究指出, *Macaronichnus* 的垂直分布范围和形状分别代表海平面和海滩形态动力学(侵蚀和沉积状态), 若出现在热带地区的海滩上, 可以作为

寒冷、营养丰富的海水上涌的指标，而深海海底潜穴可以解决无脊椎动物和脊椎动物产生深海潜穴的谜团。

对现代环境中生物扰动行为控制因素的研究，能够用于精确恢复古环境 (Hembree, 2016; Barcelos-Silveira *et al.*, 2023, 2024)。例如，火烈鸟通常围绕其轴线旋转（旋转冲压）而产生中心堆积的沉积物丘，周围是由脚踩挖出的沟槽（图 2）。Barcelos-Silveira 等（2024）通过收集分析全球所有现代火烈鸟的冲压行为和旋转冲压结构（ROT）的现有记录，表明火烈鸟倾向于在沿海环境中更频繁地跺脚，特别是在水深非常浅（~22 cm）和微碱性（~7.8 pH）的咸淡水湖，因此泥岩是最有可能发现 ROT 的岩性，但这与印迹行为和 ROT 分布相关的环境特征及火烈鸟足迹化石（*Phoenicopteroichnum* 和 *Culcitapeda* 遗迹属）主要来自高盐度、高碱度的陆相湖泊沉积的全球分布格局形成对比，故在解释带有火烈鸟类型足迹化石的高碱性和高盐湖泊环境（提出的 *Phoenicopteroichnum ichnosubfacies* (Melchor *et al.*, 2012)）时必须谨慎，并需要得到额外证据的支持。

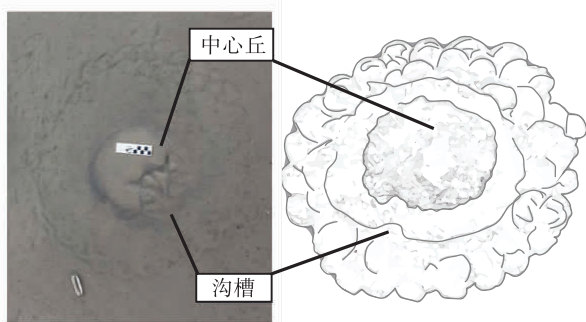


图 2 代表性冲压构造（ROT）的照片实例及其素描图
(据 Barcelos-Silveira *et al.*, 2023)

Fig. 2 Photograph example and schematic representation of rotating-stamping structure (ROT) (after Barcelos-Silveira *et al.*, 2023)

借助深海可视化仪器的进步获得深海海底大面积区域的高清图像，并随后对生物遗迹和造迹生物进行特征描述，有助于评估新遗迹学信息与环境条件之间的关系。如 Miguez-Salas 等（2024）通过 3 个最近的深海新遗迹学研究实例揭示出深海环境比最初认为的更加非均质化：（1）深海中海拔 50 m 的深海山丘会对东北大西洋 Porcupine 深海平原

（深约 4850 m）的底栖动物群落产生影响，表明生物湍流沉积组合的实质性变化可能与局部（千米尺度）环境异质性（如细微的地形变化）有关，而不是与区域尺度的时空环境变化（如海平面变化、氧化事件）有关；考虑到深海丘陵地形在全球范围内的广泛分布，它们对古遗迹学记录的影响通常被忽视，在古环境重建中有必要更多地关注这种不均一性。（2）对千岛群岛堪察加海沟地区 8 个深海站点的生物遗迹和底栖动物进行分类研究，得出生物遗迹密度与总动物群密度不相关，与停息生物遗迹呈正相关，与运动摄食生物遗迹呈负相关，因此当生物遗迹与造迹生物之间的关系能够可靠地描述时，生物遗迹多样性可能是示踪生物多样性的一个很好的指示剂。（3）基于与西北太平洋不同环境条件相关的 8 个站点的海底图像数据集，提出了一种量化混合水平的新方法——海底生物扰动强度（SBI），而 SBI 与有机质含量呈负相关，表明深海底栖生物群落受到有机物的数量和质量的强烈控制，这与传统上认为其与垂直生物扰动强度呈正相关的观点相冲突。

新遗迹学的发展，能够为古遗迹学研究提供直接的证据和信息，进而更精确地恢复古生态和古环境。随着科学技术的不断进步，如深海可视化仪器的发展，使新遗迹学不再局限于滨浅海环境，而有可能获取更多的深海新遗迹学信息，从而为深海新遗迹学研究提供更多的证据和数据支持。

6 总结与展望

综合第 5 届国际遗迹学大会中的遗迹组构专题研讨会口头报告、展板、野外地质考察和专题讨论以及私人交流等发现，遗迹学理论取得了诸多新进展，在很多领域正得到越来越广泛的应用。结合国内学科研究现状，认为此次会议的主要进展和今后需要关注的方向为：除传统遗迹学研究方法之外，出现了多学科交叉的研究趋势，如流体力学等多学科交叉的遗迹学量化研究可能成为后期引领遗迹学发展的主要方向；以往研究方向多集中在对大型灭绝事件遗迹化石特征演化研究，而小型灭绝事件相关的遗迹学研究相对较少，故后期需加强针对小灭绝事件的遗迹学研究；四足动物遗迹学研究主要集中在南美洲地区的国家，中国对四足动物遗迹的研究目前相对较少，今后可以聚焦四足动物遗迹学

研究,为国际上四足动物研究提供资料和数据;遗迹学在油气勘探方面的应用得到进一步的发展,分析生物扰动对油气储集层的改造作用,对提高油气产量和采收率具有重要意义;随着深海可视化仪器的进一步发展,深海新遗迹学研究数量有所提升,这将有利于今后在深海新遗迹学方向上进行更多的深入研究,从而更好地反映古遗迹学信息。

参考文献 (References)

- Abrahams M, Bordy E M. 2023. The oldest fossil bird-like footprints from the upper Triassic of southern Africa. *Plos ONE*, 18(11): e0293021.
- Andrade-Silva M, Francischini H, Ribeiro A M. 2024. Revision of fossil footprints Rhynchosauroides Maidwell, 1911 from the Late Triassic of southern of Brazil. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 17–19.
- Barcelos-Silveira A, Dentzien-Dias P, Francischini H, Schultz C L. 2023. Registration, morphology and taphonomy of feeding structures produced by Chilean Flamingos (*Phoenicopterus chilensis*) in a lagoon-al/barrier depositional system in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 127: 1–14.
- Barcelos-Silveira A, Delfino H C, Dentzien-Dias P, Francischini H; Schultz C L. 2024. Flamingo neoichnology: stamping behavior, biogenic structures, environmental controls and paleoenvironmental meaning. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 29–31.
- Buatois L A, Mángano M G, Luo M, Francisco J. 2024. Exploring the ichnological signature of mass extinctions. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 47.
- Gingras M, Brown D, Corlett H, Dashtgard S, Harris B, Melnyk S, MacEachern J, Zonneveld J P. 2024. Better integration of ichnology with intertidal facies models. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 114–116.
- Hembree D. 2016. Using experimental neoichnology and quantitative analyses to improve the interpretation of continental trace fossils. *Ichnos*, 23: 262–297.
- Knaust D, Bromley R G. 2012. Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments. *Developments in Sedimentology*, 64. Elsevier: 960.
- Labandeira C C, Wappler T. 2023. Arthropod and pathogen damage on fossil and modern plants: exploring the origins and evolution of herbivory on land. *Annual Review of Entomology*, 68: 341–361.
- Labandeira C C. 2024. Major questions in arthropod and pathogen herbivory in the fossil record: a brief account. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 151–153.
- Leonardi G. 2024. Brazilian dinosaur and mammal tracks, among caimans and piranhas, from the forest to the semiarid-Contribution to the formation and growth of a vertebrate ichnology school in Brazil. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 162.
- Li D, Fu J, Qi Y A, He X T, Li M, Guo F Q, Zhang C J. 2024. The significance of benthic ecospace colonization based on the ROECE at the Cambrian Series 2–Miaolingian Boundary, western Henan Province. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 75–76.
- Luo M, Buatois L A, Mángano M G, Minter N, Davies N S, Zhang L J. 2024. Infaunal response during the end-Permian Mass Extinction: Evidence from trace fossils. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 174.
- MacEachern J A, Gingras M K, Bann K L. 2024. Seilacherian ichnofacies for dynamic marine environments. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 175–177.
- Melchor R N, Cardonatto M C, Visconti G. 2012. Palaeoenvironmental and palaeoecological significance of flamingo-like footprints in shallow-lacustrine rocks: an example from the Oligocene-Miocene Vinchina Formation. Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 315–316: 181–198.
- Miguez-Salas O, Saeedi H, Brandt A, Rodríguez-Tovar F J, Dorador J, Bett B J, Durden J M, Riehl T. 2024. Deep-sea neoichnology: new insights. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 207–208.
- Niu Y B, Marshall J D, Song H B, Hu B, Hu Y, Jin Y, Zhang L J, Pan J N, Wu W. 2020. Ichnofabrics and their roles in the modification of petrophysical properties: a case study of the Ordovician Majiagou Formation, northwest Henan Province, China. *Sedimentary Geology*, 409: 105773.
- Niu Y B, Cheng M Y, Zhang L J, Zhong J H, Liu S X, Wei D, Xu Z L, Wang P J. 2022. Bioturbation enhanced petrophysical properties in the Ordovician carbonate reservoir of the Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China. *Journal of Palaeogeography*, 11(1): 31–51.
- Niu Y B, Jing C H, Zhang L J, Jin Y, Liu S X, Cheng M Y, Shao W M, Cheng Y G, Pan J N. 2024. Quantitative characterization of 3D pore structures and percolation characteristics in bioturbated reservoir media based on X-ray micro-CT: a case study of the Neogene Sanya Formation in the Qiongdongnan Basin, Northern South China Sea. *Ichnos*, 31(2–3): 199–219.
- Seike K. 2024. Neoichnology on marine deposits: beaches, shorefaces, and deep-sea floors. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 266.
- Storm M S, Hesselbo S P, Jenkyns H C, Ruhl M, Ullmann C V, Xu W, Leng M J, Riding J B, Gorbanenko O. 2020. Orbital pacing and secular evolution of the Early Jurassic carbon cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117: 3974–3982.
- Uchman A, Pieńkowski G, Ninard K, Stephen P. 2024. Hesselbo, Ichnology of the Sinemurian-Toarcian basinal deposits from the Mochras Drill Core, Cardigan Bay Basin, UK, and its application to interpretation of oxygenation changes and cyclostratigraphy. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 281–282.
- Wang Z K, Mángano M G, Buatois L A. 2024. How smoothness of trace fossils informs on evolution of locomotion, body plans, and navigational capabilities during the Ediacaran-Cambrian transition. Abstract Volume of the 5th International Congress on Ichnology. Brazil: Florianópolis, 291.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 陈吉涛)