

YIJIXUE ZAI CHENJIHUANJING FENXI HE CENGXUDICENGXUE
YANJIUZHONG DE YINGYONG

齐永安 胡 斌 张国成 著

遗迹学在沉积环境分析 和层序地层学研究中的应用

中国矿业大学出版社

遗迹学在沉积环境分析 和层序地层学研究中的应用

(焦作工学院出版基金资助出版)

齐永安 胡 斌 张国成 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是一本有关遗迹学及其应用研究的专著。全书内容分三篇：第一篇介绍了遗迹学理论及发展趋势；第二篇、第三篇分别以河南及四川盆地陆相中、新生界和新疆塔里木盆地海相古生界为研究对象，对地层中的遗迹化石和生物扰动构造进行了详细描述和综合分析，并将其成果应用到沉积环境分析、层序地层分析和油气储层物性研究中。

本书可作为遗迹学、沉积学、古生态学、石油地质学工作者的参考用书。

责任编辑 陈贵仁

图书在版编目 (CIP) 数据

遗迹学在沉积环境分析和层序地层学研究中的应用/
齐永安, 胡斌, 张国成著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.3

ISBN 7-81070-359-5

I. 遗… II. ①齐… ②胡… ③张… III. ①古生物
-应用-沉积环境-分析 ②古生物-应用-地层层序
-研究 IV. P53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 049342 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

北京地质印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 11 字数 265 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

印数 1~1000 册 定价: 20.00 元

(如有印装质量问题, 本社负责调换)

序 一

自从1967年A. Seilacher提出遗迹相的概念后,遗迹化石研究从描述遗迹学拓宽为应用遗迹学,出现了一次大发展。近年来,遗迹学的应用意义日益增涨,尤其是表现在岩石单元成因环境的精确解释和成岩作用进程的精细阐述方面。在沉积环境分析中,遗迹化石研究成果不仅能较为准确地地区分海面频繁变动下地质剖面上出现的陆相、过渡相和海相沉积记录,且能判别其时的水体深度、盐度和含氧量,这便为结合沉积、测井、地化等资料重塑各类次级环境,提供可靠的生物学依据。在层序地层研究方面,利用底质控制遗迹相和遗迹组构的梯阶变化可有效地识别各类等时界面。

作者依据国内外遗迹学的近期研究成果,详细阐述了生物遗迹的保存方式及其埋藏学信息、遗迹生物的梯阶式开发与遗迹分层、遗迹组构与生物扰动构造的描述与分析;探讨了氧控条件下的特征遗迹化石组合特征、紊流事件沉积与遗迹群落特征,以及遗迹学在层序地层学研究中的应用。作者以河南及四川盆地陆相中、新生界和新疆塔里木盆地海相古生界为研究对象,对各地层剖面的岩性和遗迹化石特征进行了详细描述和综合分析;提出了产生于河流和湖泊沉积环境中特有的八种遗迹组构、三种遗迹群落和三种代表从陆上→陆湖过渡带→湖泊的陆相遗迹相;论述了河流和湖泊沉积环境中的沉积特征、遗迹组构特征及其环境演化特征,并比较了湖泊浊积岩和海相浊积岩中生物遗迹的差别;在对各盆地层序地层学研究的基础上,运用生物扰动指数和遗迹组构综合分析的方法,在塔里木盆地志留系—下石炭统沉积储层中建立了与不同环境条件相关的九个遗迹组构;对下志留统塔塔埃尔塔格组海进体系域准层序相组合进行了详尽的分析;在塔中4井区上泥盆统东河塘组识别出河口湾沉积,并进一步提出东河砂岩由河口湾下切谷型储层和滨岸超覆型储层组成,生物扰动构造对这两类储层的物性及含油性具有严重的影响;下石炭统巴楚组生屑灰岩段发育九个米级旋回,它们的形成受米兰柯维奇轨道参数诱导的复合海平面变化所控制。

本书内容丰富,阐述详细,论证可靠,是运用多学科知识进行遗迹学系统研究的一本专著。它不仅是遗迹学工作者必要的参考书,对沉积学、古生态学、石油地质学等方面的研究也具有重要的参考价值。

中国科学院院士

殷鸿福

2001年5月22日

序 二

痕迹学自 20 世纪 80 年代初系统引入我国后,这期间无论国内国外,痕迹学研究都取得了长足进展。其标志是痕迹学研究由以赛拉赫 6 个痕迹相模式为代表的赛拉赫时代(1967~1984),进入到对赛拉赫模式进行诸多修正并新增到 10 个痕迹相模式的后赛拉赫时代(1984 以后)。在理论和应用上,从主要专注于环境解释、生态恢复,扩展到高分辨率层序地层对比、储层物性探索等更为实用的方向上去,尤其是痕迹组构概念和底层控制痕迹相的提出,为层序地层学中四级和五级层序的辨别和划分提供了有力手段,从而受到石油地质界的高度重视。

痕迹组构概念发育于西欧,而底层控制痕迹相则首先提出于北美,两者的结合并运用于四级、五级层序界面的识别和解释次级沉积环境演替的细节,则主要在北美的前陆型油气盆地进行,并取得了可观的经济效益。

我国在“八五”和“九五”期间,亦先后在东部的中原油田和西部的塔里木油田作了类似的尝试,本书作者都先后参加了此项工作。本书就是此项工作的部分结晶。读者从此书中将可看到,介于古生物学与沉积学、埋藏学和古生态学之间的痕迹学,怎样在发挥其独特的作用。

这些年来痕迹相的概念模式在不断扩大,其中陆相痕迹相研究一直是主攻方向之一。赛拉赫时代,非海相痕迹相只有代表陆相红层沉积环境的 *Scoyenia* 痕迹相一种,到后赛拉赫时代则出现了 *Teredolites* 痕迹相(Bromley, 1984), *Psilonichnus* 痕迹相(Frey and Pemberton, 1987) 和 *Mermia* 痕迹相(Buatois 等, 1995), 分别与非海相沉积和湖相沉积相关。值得一提的是, *Mermia* 痕迹相的研究与提出,即源于本书作者所在单位的研究基础及本书作者的诸多贡献,这是值得欣慰和提及的。

痕迹学作为一门发展中的新兴学科,需要在实践中不断探索,在探索中检验修正,已有的概念、做法需要继续深入研究。痕迹学研究就是要从生物—沉积物(即生物及其生活家园)的关系格局、演替变化中提取尽可能多的埋藏、生态、沉积等方面信息。可喜的是,本书在这一方面亦多有浓墨重彩之处,殊甚称道。

值此书付梓之际,就读后此感,聊志数语如上并就教于读者,是为序。

吴贤传

2001 年 5 月于焦作

前 言

遗迹学 (Ichnology) 是一门跨学科的科学。它综合了沉积学、古生物学、地层学和地球化学等学科的研究手段, 从动物和植物的活动对沉积物性质和层理方面的影响, 来阐明沉积物在沉积期和沉积后经历的演变过程。自 20 世纪 90 年代以来, 遗迹学和遗迹化石研究, 日益显示出在岩石单元成因环境的精确解释和成岩作用进程的精细阐述方面的重要意义。

在沉积环境方面, 遗迹学研究成果不仅能较准确地区分海平面频繁变动下地质剖面上出现的陆相、过渡相和海相沉积记录, 而且能有效地识别当时的水体深度、盐度和含氧量。这是因为生物 (包括动物和植物) 对淡水 (陆相)、海水 (海相)、咸水、半咸水 (河口湾、三角洲) 高度敏感, 对洪水流 (河流、三角洲)、潮汐流 (海滩、河口湾、潮汐三角洲)、风暴流 (潮下陆棚)、浊流等反应灵敏, 并能留下各类次级环境特有的生物活动遗迹、生物扰动构造和生物活动组构。这便为结合沉积、测井和地球化学等资料重塑各类次级环境提供了可靠的依据。

在层序地层的等时界面识别方面, 根据海面下降过程产生陆相遗迹化石、植物活动遗迹或发育不成熟古土壤层和海面上升过程海相生物活动留下的遗迹, 便可能将层序界面识别出来。同样, 在海泛面、最大海泛面的识别方面, 利用底质控制遗迹相和遗迹组构的差异可进行鉴别。

作者自 1994 年以来先后完成了“非海相沉积中遗迹相的研究” (国家自然科学基金)、“塔里木盆地古生界地层层序与不整合” (塔里木石油勘探开发指挥部课题)、“中、新生代陆相含煤、油气盆地层序地层学与遗迹组构研究” (煤炭科学基金)、“遗迹组构与沉积、成岩作用不连续面研究” (焦作工学院博士基金) 等课题。本书即是在总结上述研究成果的基础上写成的。

本书内容分三部分。第一部分是遗迹学基础理论研究, 主要依据国内外最新的遗迹学研究成果, 详细阐述了生物遗迹的保存方式及其埋藏学信息、遗迹生物的梯阶式开发与遗迹分层、遗迹组构与生物扰动构造, 探讨了氧控条件下的特征遗迹化石组合特征、紊流事件沉积与遗迹群落特征以及遗迹学在层序地层学研究中的应用。第二部分是陆相遗迹学及其应用研究, 主要以河南及四川盆地陆相中生界、新生界为研究对象, 对各地层剖面的岩性和遗迹化石特征进行了详细描述和综合分析, 提出了产生于河流和湖泊沉积环境中特有的八种遗迹组构、三种遗迹群落和三种代表陆上→陆湖过渡带→水下湖泊的陆相遗迹相, 论述了河流和湖泊沉积环境中的沉积特征、遗迹组构特征及其环境演化特征, 并比较了湖泊浊积岩和海相浊积岩中生物遗迹的差别。对济源盆地上三叠统至下侏罗统、东濮凹陷下第三系和峨眉山地区陆相中生界进行了较为详细的层序地层划分, 分析和总结了层序界面特征、体系域特征和层序控制因素。第三部分是海相遗迹学及其应用研究, 主要运用生物扰动指数和遗迹组构综合分析的方法, 在塔里木盆地志留系一下石炭统沉积储层中建立了

与不同环境条件相关的九个遗迹组构；对下志留统塔塔埃尔塔格组海进体系域准层序相组合进行了详尽的分析；在塔中4井区上泥盆统东河塘组识别出河口湾沉积，并进一步提出东河砂岩由河口湾下切谷型储层和滨岸超覆型储层组成，生物扰动构造对这两类储层的物性及含油性具有严重的影响；在下石炭统巴楚组生屑灰岩段识别出九个米级旋回，它们的形成受米兰柯维奇轨道参数诱导的复合海平面变化所控制。

本书由齐永安、胡斌、张国成共同撰写。其中，齐永安撰写第一篇第一章、第二章、第五章，第二篇第一章第三节、第三章部分内容，第三篇；胡斌撰写第一篇第四章，第二篇第二章第一节、第二节，第四章第一节；张国成撰写第一篇第三章，第二篇第一章第一节、第二节，第二章第三节、第四节，第三章和第四章第二节。潘结南清绘了大部分插图。

在本书撰写过程中，始终得到焦作工学院吴贤涛教授和中国矿业大学刘焕杰教授的关心、鼓励和指导。在野外工作期间，得到焦作工学院尹国勋教授、苏现波副教授，中国石油大学王毅博士、刘国臣博士、吕修祥博士等和北京石油勘探开发研究院张宝民教授的热情帮助。英国遗迹学家 R. Goldring 教授在访问焦作工学院期间，帮助复查和鉴定了部分遗迹化石标本。本书的出版得到了焦作工学院出版基金的全额资助。中国科学院院士殷鸿福教授和焦作工学院吴贤涛教授欣然为本书作序。在此一并致谢。

作 者

2001 年 5 月

目 录

第一篇 遗迹学基础理论研究

第一章 遗迹化石埋藏学	(3)
第一节 生物遗迹保存的可能性	(3)
第二节 生物遗迹的保存方式与埋藏学信息	(4)
一、半浮痕式保存	(4)
二、全浮痕式保存	(5)
三、累积生物成因构造	(6)
第二章 遗迹组构与生物扰动构造	(8)
第一节 遗迹组构的概念	(8)
第二节 生物的梯阶式开发与遗迹分层	(9)
第三节 复合遗迹组构与梯阶类型	(10)
一、复合遗迹组构	(10)
二、复合遗迹组构形成过程及梯阶类型	(12)
三、遗迹组构及生物扰动构造的描述	(13)
四、遗迹组构组分图解	(15)
第三章 氧控条件下的特征遗迹化石组合	(16)
第一节 一般组合模式	(16)
第二节 缺氧标志遗迹化石 <i>Chondrites</i>	(17)
第四章 紊流事件沉积与遗迹群落	(19)
第一节 紊流事件沉积层序	(19)
第二节 浊流事件沉积与遗迹群落	(20)
一、浊流事件沉积序列特征	(20)
二、浊积扇的岩相分布	(21)
三、遗迹群落的组成与分布特征	(22)
第三节 风暴事件沉积与遗迹群落	(24)
一、风暴事件沉积的一般序列特征	(24)
二、遗迹群落的组成与分布特征	(25)
三、风暴沉积类型及其遗迹化石的横向分布特征	(26)
第四节 洪水事件沉积与遗迹群落	(27)
第五章 遗迹化石在层序地层学研究中的应用	(31)
第一节 层序地层学的由来与发展	(31)

第二节 层序中的储层类型	(33)
第三节 底质不连续面类型、特征及识别	(33)
一、底质不连续面类型及特征	(33)
二、在露头中识别不连续面	(34)
第四节 底质控制遗迹相及其层序地层学意义	(35)
第五节 遗迹化石与层序中不连续面的识别	(36)
一、侵蚀性不连续面	(36)
二、无沉积间断面(层序缺失)	(38)
三、沉积性不连续面(凝缩段)	(38)
四、遗迹化石识别层序界面实例	(38)

第二篇 河南及四川盆地陆相中生界、新生界遗迹学及其应用研究

第一章 地层分布及遗迹化石	(43)
第一节 河南济源盆地中生代陆相含煤地层及其遗迹化石	(43)
一、上三叠统谭庄组地层及遗迹化石组成与分布特征	(43)
二、下侏罗统鞍腰组地层及其遗迹化石组成与分布特征	(48)
第二节 东濮凹陷新生代陆相含油气地层及其遗迹化石	(50)
一、东营组地层及遗迹化石组成与分布特征	(50)
二、沙河街组地层及遗迹化石组成与分布特征	(51)
第三节 四川峨嵋山地区中生代陆相地层及其遗迹化石	(53)
一、晚白垩世地层及遗迹化石组成与分布特征	(53)
二、侏罗纪地层及遗迹化石组成与分布特征	(55)
三、三叠纪地层及遗迹化石组成与分布特征	(57)
第二章 遗迹组构与遗迹群落特征	(59)
第一节 河南济源盆地上三叠统谭庄组中的遗迹组构	(59)
一、 <i>Stipsellus</i> 遗迹组构	(59)
二、 <i>Skolithos</i> 遗迹组构	(59)
三、 <i>Chondrites</i> 遗迹组构	(60)
第二节 河南济源盆地下侏罗统鞍腰组中的遗迹群落	(60)
第三节 东濮凹陷下第三系沙河街组中的遗迹组构	(62)
一、 <i>Arenicolites</i> 遗迹组构	(63)
二、 <i>Trichichnus</i> 遗迹组构	(63)
三、 <i>Daenidium</i> 遗迹组构	(63)
四、 <i>Helminthopsis</i> 遗迹组构	(63)
五、 <i>Chondrites</i> 遗迹组构	(64)
第四节 四川峨嵋山地区陆相中生代地层中的遗迹群落	(65)
一、地层及沉积背景	(65)
二、 <i>Trichichnus</i> 特化遗迹群落及其古生态环境	(65)

三、 <i>Scoyenia - Rusophycus</i> 遗迹群落及其沉积环境	(66)
第三章 地层层序划分	(68)
第一节 陆相层序地层学特点及研究方法	(68)
一、层序发育的控制因素	(68)
二、层序界面特征	(69)
三、体系域特征	(70)
第二节 河南济源盆地中三叠统 - 中侏罗统层序地层划分	(70)
一、地层序列的划分及其特征	(70)
二、层序控制因素探讨	(73)
第三节 东濮凹陷下第三系层序地层划分	(74)
一、层序界面特征	(74)
二、体系域特征	(74)
三、层序控制因素探讨	(75)
第四节 四川峨眉山地区上三叠统 - 上白垩统层序地层划分	(76)
一、层序界面特征	(76)
二、体系域特征	(77)
三、层序控制因素探讨	(78)
第四章 河流相、湖泊相沉积环境演化及伴生遗迹组构特征	(79)
第一节 河流相沉积环境演化及伴生遗迹组构特征	(79)
一、潮湿气候条件下的河流沉积及伴生的遗迹组构特征	(79)
二、干旱气候条件下的河流沉积及伴生的遗迹组构特征	(82)
第二节 湖泊相沉积及其伴生遗迹化石特征	(83)
一、 <i>Scoyenia</i> 遗迹相	(83)
二、 <i>Mermia</i> 遗迹相	(85)
三、湖泊事件沉积中的遗迹化石特征	(86)
四、湖泊遗迹组构及其演化	(89)

第三篇 塔里木盆地海相古生界遗迹学及其应用研究

第一章 遗迹组构及其环境解释	(95)
第一节 下志留统塔塔埃尔塔格组遗迹组构及其环境解释	(95)
一、 <i>Helminthopsis - Diplocraterion</i> 复合遗迹组构	(95)
二、 <i>Skolithos</i> 遗迹组构	(97)
三、 <i>Palaeophycus</i> 遗迹组构	(98)
四、 <i>Skolithos - Arenicolites</i> 遗迹组构	(99)
五、 <i>Gyrolithes</i> 遗迹组构	(100)
第二节 上泥盆统东河塘组遗迹组构及其环境解释	(101)
一、 <i>Ophiomorpha</i> 遗迹组构	(101)
二、 <i>Skolithos - Palaeophycus</i> 遗迹组构	(102)

第三节 下石炭统巴楚组遗迹组构及其环境解释	(104)
一、Chondrites 遗迹组构与半闭塞台地低能低氧环境	(104)
二、Thalassinoides 遗迹组构与高能碳酸盐浅滩环境	(105)
第二章 遗迹化石在沉积环境分析与层序地层学研究中的应用	(106)
第一节 下志留统塔塔埃尔塔格组遗迹化石与浪控滨线海泛面的识别及准层序相组合	(106)
一、海进滞留沉积	(106)
二、海侵沉积在准层序中的表现	(106)
三、遗迹化石与海泛面的识别及准层序相组合	(107)
第二节 下志留统塔塔埃尔塔格组遗迹化石与潮控滨线海泛面的识别及准层序相组合	(110)
一、遗迹化石与海泛面识别	(110)
二、遗迹化石与准层序相组合	(111)
第三节 上泥盆统东河塘组河口湾遗迹学、沉积学与层序地层学	(113)
一、河口湾相模式研究	(113)
二、塔中4井区河口湾遗迹学、沉积学及层序地层学研究	(117)
第四节 下石炭统巴楚组米级碳酸盐旋回	(121)
一、米级旋回类型及沉积特征	(121)
二、米级旋回的 Fischer 图解	(122)
三、米级旋回的成因机制与复合海平面变化	(123)
四、云灰岩储层评价及分布	(124)
第三章 生物扰动构造对砂岩储集性能的影响	(125)
第一节 生物扰动构造对下志留统沥青砂岩储集性能的影响	(125)
一、生物扰动构造与储层物性的关系	(125)
二、生物扰动构造对储层物性影响因素分析	(127)
第二节 生物扰动构造对上泥盆统东河砂岩储集性能的影响	(127)
一、砂岩储层中的遗迹化石与生物扰动构造	(127)
二、生物扰动构造与砂岩储集性	(128)
三、生物扰动构造对储层储集性影响因素分析	(129)
参考文献	(130)
图版及图版说明	(137)

第一篇

遗迹学基础理论研究

第一章 遗迹化石埋藏学

埋藏学是研究生物体从死亡到成为地质记录的演变历程的一门学科。岩层中的实体化石大都经历了这样一系列过程：① 生物体死亡、软体组织分解、硬体分散；② 沉积作用过程中被分选、搬运、破坏，然后和其他沉积物一起沉积下来；③ 在沉积物内发生压实和化学作用；④ 遭受构造运动和出露地表后风化、侵蚀作用的进一步破坏。其结果大多数反映生物体生活状况的信息在这一系列过程中被过滤掉了，但遗迹化石的情况则有所不同。潜穴从形成到保存为化石，所经历的埋藏过程与实体化石不同，其结果也不一样。埋藏过程中，有些信息不但未被过滤掉，反而被进一步加强。例如，一个在连续沉积的底层中形成的复杂潜穴系统，可以在岩石记录中展现其所有细节，而研究现代生物的潜穴，却只能靠铸模。再如，形成于深海环境的遗迹化石，可以方便地提供更多有关深海底栖生物行为习性的信息。

当然，并不是所有的生物遗迹都会有这样的结果。和实体化石一样，能被保存下来的生物遗迹只占很小一部分。Goldring (1965) 曾提出过生物遗迹“保存可能性”的概念。对不同的生物遗迹，保存的潜力有很大不同。生物遗迹能否被保存下来，在很大程度上依赖于各种突发事件。因此，保存在岩石记录中的底栖生物遗迹，大都是原生生物遗迹群落经过显著变异后的产物。很显然，它们无法提供不同物种相对生物量的证据，但它们可以提供遗迹得以保存下来的那些沉积物扰动者的有关信息以及它们活动时的环境情况。

第一节 生物遗迹保存的可能性

许多作者都强调，现知的几种生物遗迹被保存下来的可能性有很大差别。Hertweck (1972) 在调查了美国乔治亚州海岸地区生物遗迹的分布情况后遇到过的问题就是：它们在地质记录中被保存下来的可能性到底有多大？

在海水汹涌的海岸地带，Hertweck 没有发现任何生物潜穴。沉积物表面不断被海浪冲刷、改造，即使有生物活动，其潜穴也很快被破坏掉。因此，在高能条件下，只有挖掘较深的生物潜穴才有较高的保存可能性。

局部地带的海岸沙沉积中，有密密麻麻的双壳类 *Donax variabilis* 生活，但它们的活动仅局限在顶层 3 cm 的范围。因此，虽然它们在生物量上占底栖生物群落的主导地位，其遗迹却极少能得以保存，每一次拍岸浪过后，它们的遗迹都被破坏殆尽。而同一环境中挖掘较深的节肢动物 *Calichirus major* 的潜穴（图 1-1-1），则大多可以保存下来。它们的潜穴建得坚固，并通常带有衬壁，而且深度远在生物或无机作用的破坏深度之下。

当然，*Donax variabilis* 的潜穴也并非完全不能保存下来。在相邻的更新世沙沉积中，*Calichirus major* 潜穴最上部的窄穴道能被保存下来，说明在突发和永久埋藏这类罕见条件下，*Donax* 的潜穴是完全可以保存下来的。

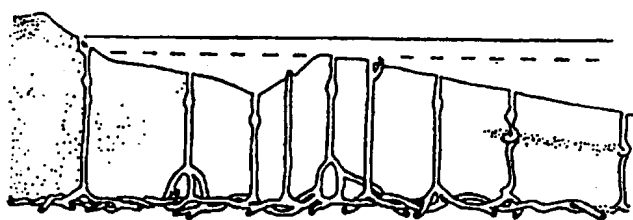


图 1-1-1 出现在 3 m~4 m 高海滩剖面上的群居 *Calichirus major* 潜穴系统
(据 Frey 等, 1987)

所有生物遗迹都有保存下来的可能性。但类似 *Donax* 等在经常遭受物理改造的沙质沉积物中生活的生物, 其活动遗迹是很难保存下来的。另一个显著的例子是 *Paraonis fulgens* 的遗迹。这种现代生物在海滩沙沉积的表面留下大量惹人瞩目的螺旋状遗迹, 至今尚未在地质记录中出现过。

因此, 深层的生物潜穴比浅层的潜穴更有可能被保存下来。事实上, 沉积底层的最上部混合带常受到生物的彻底扰动, 只有超出该混合带之下的生物遗迹才能得以保存。

第二节 生物遗迹的保存方式与埋藏学信息

一、半浮痕式保存

前已所述, 生物遗迹要得以保存下来, 其深度应超出受生物彻底扰动的底质顶部混合带以下, 这一规则对逐渐加积的海底底栖生物遗迹群落是适合的。同其他规则一样, 这条规则也有例外, 像迅速掩埋或环境迅速脱氧这类突发事件, 可以打断日积月累的破坏过程, 使混合带以内的遗迹保存下来。Savrda 和 Ozalas (1993) 的研究表明, 氧化事件层可以保存混合带内的遗迹结构, 只不过是这类情景并不十分常见。

泥质海底被沙质浊流沉积迅速掩埋, 前者表层混合带中的开放潜穴被后者充填形成铸模, 因而能被完美地保存下来。这些遗迹以半浮痕的形式被保存在浊积层的底面上, 如复理石序列中常见的图画型遗迹化石。Ekdale (1980)、Ekdale 等 (1984) 以及 Gaillard (1988) 等在现代深海海底的箱状取芯表层都发现过这类精美的生物成因构造, 但这些构造只有当它们依然被生物占据或未空着的时候才可分辨。这些发现使著名遗迹学者 Adolf Seilacher 欣喜不已, 他早在这些发现之前的 1977 年就依据图画型遗迹的埋藏学特征预测过它们在现代海底的存在。

当然, 要使这类遗迹埋藏下来并得以保存, 浊积层必须有一定的厚度。这样, 新的底层中逐渐发育起来的混合带, 能高于这些被埋藏的遗迹。实际上, 浊积层的厚度直接决定新(后沉积)遗迹群落的哪些成员能穿插到被埋藏的砂-泥界面, 与保存下来的前浊积(前沉积)生物构造混合在一起。Seilacher (1962b, 1964) 曾根据这一理论推断过浊积岩遗迹化石组合中不同潜穴的相对穿插深度。

在迅速埋藏之前, 侵蚀强度的不同, 可以暴露和充填不同深度(梯阶)的生物潜穴。这一现象不仅出现在深水浊流环境, 而且也见于浅水环境。Wetzel 和 Aigner (1986) 曾经指出, 他们在风暴沉积层底面上所发现的半浮痕形式保存的遗迹化石, 属于不同的深度组

合（梯阶）。根据已知的梯阶深度，他们可以判断风暴的相对侵蚀量有多大。图 1-1-2 是他们研究的成果，图 a 表示的是由 *Rhizocorallium* 和 *Thalassinoides* 两层梯阶构成的完整的原始生物遗迹群落，如果风暴沉积层底面上保存的是 *Rhizocorallium* 的铸模（图 b），说明风暴的侵蚀作用较弱，如果风暴沉积层底面上保存的是 *Thalassinoides* 的铸模（图 c），则说明风暴的侵蚀作用较强。这一结论已得到广泛应用（Wang, 1993; Droser 等, 1994）。

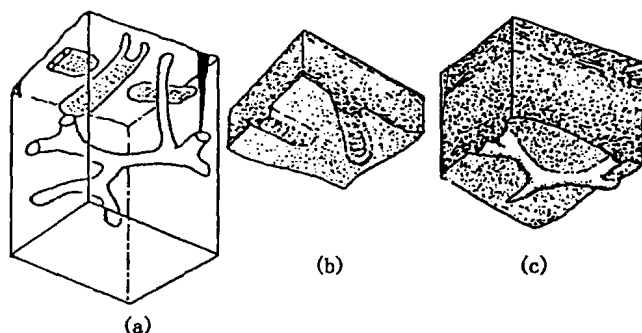


图 1-1-2 在含有几个水平层居群作用的海底，不同量的冲刷和充填可出现不同类型的生物成因构造
(据 Bromley, 1996)

二、全浮痕式保存

和风暴或浊流事件沉积不同，连续沉积方式可使生物遗迹以全浮痕的形式保存下来。如果生物潜穴具有不同于周围沉积物的穴壁或被充填以不同的物质，生物潜穴会变得非常醒目。在这种沉积环境中，即使岩性对比较弱，但由于充填物和穴壁与围岩在压实、沉积物颗粒的定向以及有机物含量上有所不同，所以潜穴也会得到完善保存。这些结构和化学成分上的差异所引起的局部成岩作用，可增强生物遗迹的可辨程度。

保存于岩性单一的沉积物中的生物成因构造分辨率往往较低，粘土和泥质沉积中的情况更是如此。多数情况下，必须使用特殊技术来提高这些生物遗迹的分辨率。

在远洋考察船上对深海泥质沉积物箱状取芯的处理通常是用电线切割，这样处理的结果往往使得岩芯表面剪切变形，看到的生物潜穴只能是模糊的斑点。要想了解详细的生物扰动情况，可以使用水射流小心喷洒切面。同样，使用一般的做法，深海红色粘土沉积中的深部潜穴也无法看得清楚，必须使用特殊的方法获得干净的切面。

图 1-1-3 说明遗迹化石的保存方式与埋藏过程的关系。图的左上方是对保存方式的描述。图的左下部分是对下浮迹痕提出的七种解释：(a) 生物在沉积物表面留下的沟痕；(b) 生物在侵蚀作用过后的固底上留下的沟痕；(c) 在岩化的沉积物上刻下的沟痕或钻孔溶蚀痕；(d) 节肢动物在层间留下的内沟痕迹；(e) 泥质沉积物中开放的潜穴被剥离后留下的沟痕；(f) 沉积物中被充填的潜穴被剥离后留下的沟痕；(g) 在沙-泥沉积界面形成的潜穴坍塌后留下的沟痕。图的右上部分说明，外生迹和内生迹的形成过程与潜穴铸模有明显差别，这里由海胆形成的内生迹具新月形的回填构造。图的右下部分描述的是内生迹的形成过程。

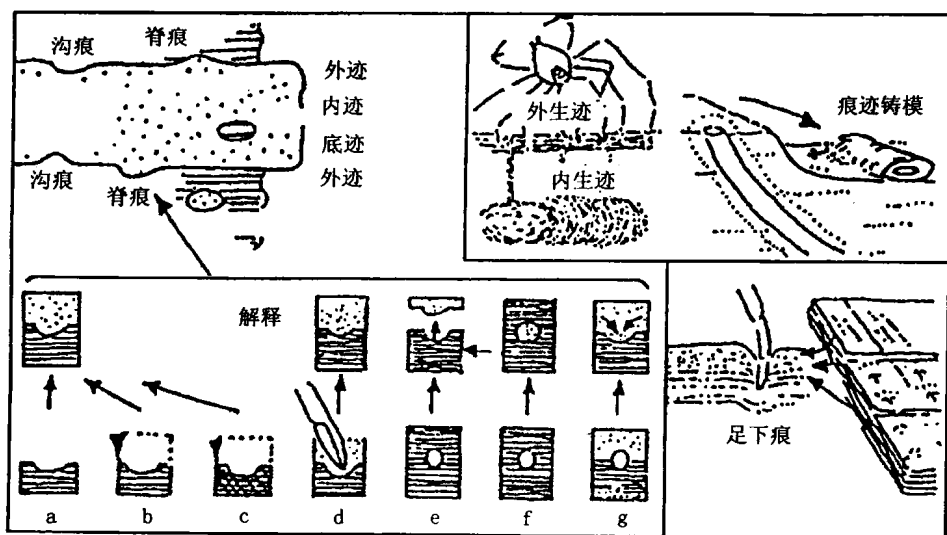


图 1-1-3 遗迹化石的保存模式
(据 Goldring, 1991)

三、累积生物成因构造

掘穴生物通常有较大的活动范围。即使是固定的食沉积物或食悬浮物生物，也都不断变换位置；而自由移动的食沉积物或食腐生物，更是或多或少地在连续运动中生存。因此，尽管生物潜穴在某一时刻有一定固有的形态，但随生物在底质中频繁或连续不断地变换或移动位置，最终留下的遗迹往往具有完全不同的形态特征。

一些遗迹化石的蹼状构造在尚未经历成岩作用的沉积物中是无法分辨的。人们发现，只有为数不多的现代掘穴生物与蹼状构造有关，如 *Echiurus echiurus* (图 1-1-4)，*Corophium volutator*，*Thyone briareus*，*Heteromastus filiformis* 以及 *Nereis diversicolor*。但是，带有蹼状构造的遗迹化石在寒武纪到全新世的地层中都有大量记录。由此推断，蹼状构造在现代海底也大量存在。事实上，用放射照相技术可以清晰地发现海底取芯中的蹼状构造。

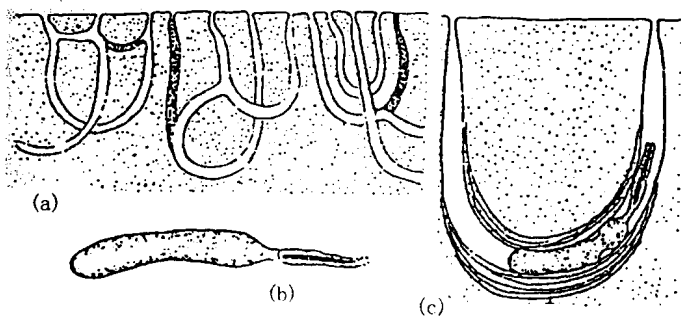


图 1-1-4 *Echiurus echiurus* 营造的潜穴

另一个例子是，沙蜀的J形潜穴(图 1-1-5)有时可发育成辐射对称的累积构造。这种累积构造作为一体保存下来，成为一类遗迹化石，如 *Dactyloidites* 遗迹属。如果这类