

# 生物成因的构造在环境解释中的应用

## ——遗迹学研究的新进展

周志澄

(中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008)

### 内 容 提 要

系统介绍了有关应用遗迹化石的生态分类、特征的遗迹化石、遗迹相和阶层分析来进行环境分析的几种思路以及生物成因构造对沉积速率、含氧量、能量级别、底质和含盐度等环境指标的解释,并提出运用生物成因的构造来解释环境时值得注意的问题。

**关键词** 生物成因构造 遗迹化石 遗迹相 遗迹群落 阶层分析 机会主义遗迹化石 均衡遗迹化石

### 一、前 言

沉积物在沉积过程中,不仅受到介质的机械作用和化学作用的影响,还受到另一种作用的影响,即生物作用的影响。这是因为,沉积环境一方面控制着各种生物的分布,影响着生物的行为方式,另一方面生物活动的结果反过来不仅对原有的沉积结构和构造可以起一种破坏、改造的作用,而且,还会产生新的、生物成因的结构、构造,就这一意义而言,沉积物的沉积过程,实际上是机械作用、化学作用和生物作用的综合作用过程。在不同的沉积环境里,生物的行为方式不同,生物活动产生的沉积构造也各不相同,因此,我们可以利用这些生物成因的构造,来帮助恢复和重建原始的沉积环境。

五十年代,特别是七十年代以来,遗迹学研究取得了飞速发展,它不再仅仅作为古生物学研究的一部分,而且,作为一门边缘科学,在古生态学和沉积学方面,开拓了自己的研究新领域。国内外许多遗迹学家、古生态学家和沉积学家,把遗迹学研究中的的一些新理论应用到沉积学研究中,在运用生物成因的构造进行环境解释方面,取得了许多新的进展(Seilacher, 1964, 1978; Frey, 1975; Bromley, 1990; Ekdale *et al.*, 1984; Curran, 1985; Bottjer *et al.*, 1987; Wetzel, 1991; 杨式溥, 1984a; 吴贤涛, 1985; 晋慧娟等, 1991)。

本文试图系统地介绍有关这一方面研究的最新成果,以期引起广大地质工作者的重视。

### 一、生成成因构造的分类

根据 Frey 和 Pemberton (1985) 的划分,生物成因的构造划分如下:

表 I 生物成因构造的分类  
The classification of biogenic structures

生物成因的沉积构造 (Biogenic sedimentary structure)——在未固结颗粒的底质的表面上或内部由生物活动所产生的生物成因构造,如足迹、移迹和类似的构造	生物扰动构造 (Bioturbation structure)——生物活动产生的足迹、掘穴和其它类似的构造,破坏了生物成因的和机械成因的层理特征或沉积组构
	生物成层构造 (Biostratification structure)——生物活动产生的、具有层理特征的一种生物成因的沉积构造,如生物成因的粒序层理、足丝席、某种叠层石和其它
	生物沉积构造 (Biodeposition structure)——生物活动产生的沉积物 (如粪球粒、假粪粒、生物侵蚀产物以及其它)集中起来,形成的一种生物成因的沉积构造
生物侵蚀构造 (Bioerosion structure)——生物通过机械或生物化学作用,采用钻、啃、刮擦、咬及其它方式,挖掘到坚硬底质中去所产生的一种生物成因构造	

二、运用生物成因的构造解释环境的几种思路

运用生物成因的构造来解释环境,主要可以通过下列几种途径:(1)对遗迹化石进行生态分类,了解造迹生物的生态习性,可以获得生态学和沉积环境方面的信息;(2)一些特殊的遗迹化石,可以提供某种环境指标;(3)遗迹相分析,了解遗迹化石组合的水深分布和总的沉积环境特点;(4)阶层(tier)分析,可以提供许多环境指标(如含氧量、沉积速率、底质等)信息,特别对于钻孔岩芯分析,具有重要意义。

(一)遗迹化石的生态分类,对于环境解释的意义

Seilacher(1953)根据生物的行为方式,把遗迹化石划分出 5 种类型:居住迹、爬行迹、休息迹、觅食迹和进食迹,后来,在此分类的基础上,又增加了逃逸迹、耕作迹(Ekdale *et al.*, 1984),捕食迹(Ekdale, 1985)和均衡迹(Frey and Pemberton, 1985)。它们的特征分述于下:

1. 居住迹(Domichnia) 水底动物(主要为滤食生物,有时也有食泥生物甚至肉食生物)所建立的居住构造。通常具有栖管壁的遗迹为永久性的居住迹,如粘结的蠕虫管或具有球粒壁的虾类栖管;而那些缺乏衬壁(lining)的端足类所建造的垂直或水平掘穴,生物居住的时间要短些。
2. 爬行迹(Repichnia) 由动物奔跑、行走、爬行、蠕动或犁开沉积物运动而产生的遗迹,包括恐龙的足印,蛇的移迹和三叶虫的足辙迹等。
3. 休息迹(Cubichnia) 生物短时间停留在沉积物表面留下的印痕,如三叶虫挖出的“穴状”小凹坑(*Rusophycos*)或一步一步向前移动的海星印痕(*Asteriacites*)。
4. 觅食迹(Pascichnia) 由生物的移动和觅食两种行为方式的结合所产生的遗迹,它们产于沉积物表面或沉积物内部,有时,觅食迹显示出规则的、设计好的线路,以便有效地覆盖沉积物表面,如盘绕的几何形态(*Spirodesmos*)或呈紧密曲折状(*Helminthoida*)以及没有规律的几何形态(*Helminthopsis*)。
5. 进食迹(Fodinichnia) 由食泥生物半固定的栖居和在沉积物中觅取食物两种行为方式结合所产生的遗迹。有些造迹生物(trace makers)对沉积物没有选择,简单地穿过软泥,让

沉积物从一端进入,从另一端排出(*Planolites*,*Muensteria*),或者,造迹生物会以分叉的甚至放射状的方式从一个中心点伸出,在沉积物中反复搜索食物(*Phycodes*,*Asterosoma*),另外有一些进食迹表现出系统的、分枝的、相当复杂的进食类型(*Chondrites*)或前进式蹼状构造(*Zoophycos*)。

6. 逃逸迹(Fugichnia) 由于沉积物的迅速堆积或被侵蚀,使得造迹生物及其它们所居住的栖管向上或向下移动,藉此,造迹生物能够使自己在沉积物中的位置与沉积表面之间的距离保持一致(*Teichichnus*,*Diplocraterion*)(图版 I,图 6)。逃逸迹大多由双壳类和其它滤食生物所造成,有时也可由植物产生(李广雪等,1992)。

7. 耕作迹(Agrichnia) 由造迹生物栖居和进食两种行为方式相结合所产生的遗迹,造迹生物以“耕作”或“圈闭”的方式来获取食物,遗迹呈复杂的水平弯曲体系(*Cosmohaphe*),双螺旋形(*Spirohaphe*)或六边形的网状体系(*Paleodictyon*)。

8. 捕食迹(Praedichnia) 由生物的捕食行为所产生的遗迹,如食肉者在软体动物的壳质上所钻的光滑的圆钻孔。在松软底质上所产生的捕食迹不易鉴别和保存。

9. 均衡迹(Equilibrichnia) 由于缓慢的进积作用(grading)或退积作用(degrading),内生动物不得不经常地向上或向下调整它们的掘穴深度,使得生物本身与沉积表面的深度保持在一种均衡状态。

表Ⅱ 青海可可西里地区中生代遗迹化石的分布及其沉积环境

时  代	遗 迹 化 石	岩 性	行 为 习 性*	遗 迹 相	沉积环境			
					陆 相	潮 间 带	浅 海 陆 架	半 深 海 深 海
K	<i>Acanthorhaphe</i> sp. ? <i>Scopyenia</i> <i>Ophiomorpha annulata</i> <i>Palaeophycus</i> sp. B	红色粉砂岩、 细砂岩	C F D,D—F D	<i>Scopyenia</i> ichnofacies				
	<i>Arenicolites</i> sp.		D—F	<i>Skolithos</i> ichnofacies				
J <sub>3</sub>   J <sub>2</sub>	<i>Thalassinoides suevicus</i> ? <i>Phycodes</i> <i>Palaeophycus</i> sp. A <i>Planolites montanus</i> <i>Muensteria</i> sp.	钙质粉砂岩、 细砂岩、及灰 岩	D,D—F F D F F	<i>Cruziana</i> ichnofacies				
T <sub>3</sub>	<i>Planolites montanus</i> <i>Chondrites</i> sp. B <i>Chondrites</i> sp. A	板岩、粉砂岩、 钙质粉砂岩、 复理石沉积	F F F	<i>Zoophycos</i> ichnofacies - <i>Nerites</i> ichnofacies				

\* C——Crawing structures (爬行构造)  
D——Dwelling structures (居住构造)  
F——Feeding structures (进食构造)

遗迹化石的生态分类,可以帮助我们分析原始的沉积环境,如居住迹在潮间带比较发育,爬行迹、休息迹在浅海陆架环境比较丰富,而逃逸迹则往往与突发性的事件有关;觅食迹和耕作迹在深海、半深海环境中经常出现,因此,对遗迹化石进行生态分类,可以帮助我们认识沉积环境的总的面貌。笔者在研究青海可可西里地区中生代遗迹化石时发现,晚三叠世以进食构造为主,中、晚侏罗世,则进食和居住两种构造共存,到了晚侏罗世末,居住构造更为发育,遗迹化石生态类型的变化,反映了海底水和沉积物中含氧量的增加、沉积环境由深海、半深海相向滨海相过渡的历程。

(二)特征的遗迹化石的指相意义

有些遗迹化石对某些环境指标具有明显的指相意义,Chondrites(线粒迹)对缺氧环境的指示作用,是一个最著名的例子。

表Ⅲ 中生代海相地层中不同含氧量中遗迹化石垂直分层  
Tiering relations of trace fossils of Mesozoic marine strata that represent oxic  
(after Bromley and Ekdale,1984)

遗迹化石	海底水中氧的含量降低————→						
漫移迹 <i>Planolites</i>							阶 层 水 平  Tier level
海生迹 <i>Thalassinoides</i>							
大动藻迹 <i>Large Zoophycos</i>							
小动藻迹 <i>Small Zoophycos</i>							
大线粒迹 <i>Large Chondrites</i>							
小线粒迹 <i>Small Chondrites</i>							
	完 全	不 完 全	不 完 全	不 完 全	不 完 全	零	生 物 扰 动
	L. Maastrichtian 白垩 莫恩斯陡崖 丹麦	Santonian 水道 充填 奥斯汀 白垩 达拉斯 得克萨斯 美国	Turonian 白垩 坦丘 德维茨斯 英国	Turonian 底部 泥灰岩 汉诺威 德国	L. Jurassic (Toarcian) Posidonienschie- fer 组 霍尔茨明登 德国南部	Danian 底部 鱼粘土 斯蒂文斯陡崖 丹麦	举  例

Chondrites 是一种分布比较广泛的遗迹(图版Ⅱ,图1),自寒武纪至现代都有分布,它可以出现在不同的岩石类型中(砂岩、页岩或灰岩)和不同的沉积环境中(从滨海到深海盆地)。值得注意的是,在通常被认为在缺氧条件下所沉积的黑色、层纹状的钙质粘土中,当其它掘穴遗迹都已消失时,Chondrites 仍然可以存在,这表明,Chondrites 的造迹生物对于缺氧环境具有较强的忍受能力。Bromley 和 Ekdale(1984)曾将世界各地中生代海相地层剖面中遗迹化石阶层分布进行了对比(表Ⅲ)。在丹麦莫恩斯陡崖下 Maastrichtian 的地层中,含有从最上阶层的 Planolites(漫移迹)到最下阶层的 Small Chondrites(小线粒迹)的连续谱系,同时,这一地层中的生物扰动最完全。上述特征反映原始沉积环境中海底水的富氧条件,各种底栖

生物都能在这一环境下生活。当海底水中氧的含量逐渐降低时,最上阶层的 *Planolites* 首先从地层中消失,然后是 *Thalassinoides* (海生迹), *Zoophycos* (动藻迹),与此同时,生物扰动强度也随着海底水中氧的含量降低而逐渐减弱。在丹麦斯蒂文斯陡崖 Danian 底部含鱼粘土层中,当原始的沉积环境变为完全的缺氧条件时, *Chondrites* 最后从地层中消失,生物扰动也完全停止(表Ⅲ)。遗迹化石垂直分层在不同地层中的变化关系,反映了各种底栖的造迹生物对于缺氧环境的不同忍受能力,由此可以看出 *Chondrites* 的造迹生物对于缺氧环境具有最强的忍受能力,当地层中其它遗迹化石都已消失,只剩下 *Chondrites* 一种时,往往表明原始沉积环境中,氧的含量非常低,就这一意义上来说, *Chondrites* 可以作为衡量缺氧环境的有用指标。

### (三)遗迹相分析

1. 关于遗迹群落(ichnocoenose)和遗迹相(ichnofacies)的概念 根据 Dorjes 和 Hertweck(1975)的解释,遗迹群落和遗迹相反映遗迹学的两个不同概念,前者是一个古生物学术语,一个遗迹群落是一个生物群落(biocoenose)的个体在底质(substrate)上或底质内部生活活动所产生的遗迹的共生组合(associations);后者则是一个沉积学术语,如果一个遗迹群落能够保存下来,出现在化石记录中,则这一保存下来的遗迹群落就赋予一个沉积体一种遗迹相。遗迹相与遗迹群落的关系,类似于生物相与生物群落的关系:一个生物相可以帮助我们重建一个古生物群落(Paleobiocoenose);而一个遗迹相则可以帮助我们识别一个遗迹群落。

遗迹相的概念最早由德国古生态学家 Seilacher 所提出(Seilacher, 1964, 1967),他把遗迹相解释为自寒武纪以来在全球范围内重复出现的、与某种沉积相和沉积环境有关的遗迹化石共生组合。由此可见,Seilacher 的遗迹相强调了 3 方面的内容:重复出现;时间跨度和空间分布范围;与一定的沉积相和沉积环境有关。

后来,遗迹相这一术语曾被不同的学者在不同的范围内应用,如 Hayward(1976)和 D'Alessandro 等(1986)把遗迹相作为某种特殊的岩石序列中的独特单元,依据遗迹化石组合来解释局部重现的岩相,与 Seilacher 所提出的遗迹相概念相比,它所涉及的时间跨度和空间分布范围,大大缩小了。为了区别 Seilacher 的遗迹相与其它遗迹相的概念,Frey 和 Pemberton(1987)提出把 Seilacher 的遗迹相称之为原型遗迹相(archetypical ichnofacies)。

2. Seilacher 的遗迹相类型及其环境意义 Seilacher(1978)特别强调水深对于遗迹相分布所起的控制作用,他指出:“水深本身不是一个主要的生态因素,但是一个非常重要的参数,扰动、沉积速率和作用、成岩作用、生产量和进化过程,都是以这种或那种方式与水深有关。”

根据遗迹化石组合的水深分布及盐度,Seilacher(1967)最初提出了 6 种遗迹相(*Scoyenia* 遗迹相, *Skolithos* 遗迹相, *Glossifungites* 遗迹相, *Cruziana* 遗迹相, *Zoophycos* 遗迹相和 *Nereites* 遗迹相)。后来,根据遗迹产生的底质条件,又增加了 *Trypanites* 遗迹相(Frey and Seilacher, 1980)和 *Teredolites* 遗迹相(Bromley *et al.*, 1984)。Ekdale 和 Berger(1978)描述了一个深海遗迹相。最近,Lockley 等(1987)鉴定出 *Curvolithus* (曲带迹)遗迹化石组合, Frey 和 Pemberton(1987)命名了一个 *Psilonichnus* (螃蟹迹)遗迹群落(ichnocoenosis)有人把这两者作为海陆过渡相的遗迹相代表(胡斌等, 1992)。

表Ⅳ 遗迹相分类  
The classification of ichnofacies

<div>盐度</div> <div>水深</div> <div>底质</div>	淡水	海水			
		滨海	陆架	半深海	深海
软底 Softground	<i>Scoyenia</i> 遗迹相	<i>Skolithos</i> 遗迹相	<i>Cruziana</i> 遗迹相	<i>Zoophycos</i> 遗迹相	<i>Nereites</i> 遗迹相, deep-sea 遗迹相
半硬底 Firmground	<i>Glossifungites</i> 遗迹相				
硬底 Hardground	<i>Trypanites</i> 遗迹相				
木底 Woodground	<i>Teredolites</i> 遗迹相				

目前广泛应用的 9 种遗迹相,它们的划分是以盐度、底质和水深条件为基础(表Ⅳ)。

(1)*Scoyenia* 遗迹相最初由 Seilacher(1967)提出,指的是陆相红层中的遗迹化石组合,后来的作者把这一遗迹相的概念扩大到包括所有陆相沉积物中的遗迹化石组合。Frey 等(1984)对 *Scoyenia* 遗迹相的概念进行重新厘定,认为和海相遗迹相一样,非海相遗迹相也是由不同的遗迹相所组成,而 *Scoyenia* 遗迹相仅属于非海相遗迹相中的一种,并建议把这一遗迹相的概念限制在由 *Scoyenia gracillis*, *Ancorichnus coronus* 组成的或在行为习性上和生态学上与此相同主要由节肢动物所产生的遗迹化石组合,包括水平的新月形进食掘穴、爬行构造和垂直的居住构造,产生这一遗迹相的造迹生物(*trace makers*)主要生活在潮湿的底质上,如湖泊相或河流相的洪水平原上。我国青海可可西里地区白垩系陆相地层中发育有这一遗迹相(表Ⅱ)(图版Ⅰ,图3)。

(2)*Skolithos* 遗迹相与滨海高能环境有关,为产生于快速的沉积作用与侵蚀作用交替发生的、移动的沉积底质上的遗迹化石组合。由于水体比较活动,水体富含微生物及其它营养物质,造迹生物主要为滤食生物,所产生的遗迹以垂直圆柱状或 U 形栖管(往往具有前进式蹼状构造(*protrusive spreiten*)或后退式蹼状构造(*retrusive spreiten*)和加固的栖管壁)为特征,造迹生物的行为方式以栖居为主。*Skolithos* 遗迹相的代表性遗迹化石有 *Skolithos*, *Diplocraterion*, *Ophiomorpha*, *Monocraterion* 和 *Arenicolites* 等,西藏南部白垩纪 *Maastrichtian* 晚期至早第三纪古新世早期的基堵拉砂岩中,就发育有 *Skolithos* 遗迹相(Zhou Zhicheng, *in press*)(图版Ⅰ,图1)。

(3)*Glossifungites* 遗迹相通常发生在滨海或潮下带,在未完全石化的、处于半固结状态的沉积底质上所产生的遗迹化石组合,往往发育在停积面(*omission surface*)上,以垂直、圆柱状、U 形或泪珠状钻孔或稀疏至密集分叉的居住掘穴为特征,代表性的遗迹化石有 *Thalassinoides*, *Rhizocorallium* 等。我国安徽巢县凤凰山下石炭统和州组顶部(周志澄等,1991)(图版Ⅰ,图5)和广东花县赤坭下石炭统对岗组(杨式薄,1989)发育有这一遗迹相。

(4)*Trypanites* 遗迹相发生在滨海的岩岸、硬底(*hardground*)、沉积间断面或生物底质(介壳、骨)上,由钻孔生物如双壳类、多毛类、膝壶、星虫动物等所产生的(包括藻类和细菌所产生的微钻孔)遗迹化石组合,以指状、袋状和水平

巷道式的钻孔为特征。造迹生物的行为方式以居住为主,也包括其它如觅食和进食构造。Trypanites 遗迹相属于停积后(*postomission*)遗迹相,在 Trypanites 遗迹相发育的残留面(*relict*)上,往往可分辨出几个世代的遗迹相,如停积前(*preomission*)的遗迹相(Skolithos 遗迹相、Cruziana 遗迹相或 Zoophycos 遗迹相)和停积面(*omission surface*)遗迹相(Glossifungites)遗迹相。(5)Teredolites 遗迹相是由 Bromley 等(1984)命名的。Teredolites 常常群集在木质基底上,但分异度较低,形状似棒状,自开口处至远端逐渐变粗,遗迹表面常具他饰(*xenoglyph*)和生物雕饰(*bioglyph*)。Teredolites 的造迹生物被认为与双壳类海笋科有关。(6)Cruziana 遗迹相产于低潮线之下到风暴浪基面之上的浅海陆架的松软沉积底质上的遗迹化石组合,在这相对稳定、平静的环境里,造迹生物以食泥生物为主,也包括食肉生物和食腐生物,滤食生物相对较少。遗迹化石以水平的表迹(如爬行迹、休息迹)为主,有时也出现一些垂直掘穴。代表性的遗迹化石有 Cruziana, Asteriacites, Phycodes, Teichichnus, Crossopodia 和 Rhizocorallium, 不规则倾斜或水平形式的 Ophiomorpha 和 Thalassinoides 也可出现。(7)Zoophycos 遗迹相是在半深海斜坡环境中,在松软的沉积物底质上所产生的遗迹化石组合。在这一环境中,沉积作用有时是阵发性的,碎屑流、浊流及滑塌作用比较发育,造迹生物不仅在层面上觅食,而且要在底层内搜索。代表性的遗迹化石有 Zoophycos, Lorenzinita, Chondrites 等。近年来,随着资料的不断积累,有关 Zoophycos 产状的许多新的发现表明, Zoophycos 可以在不同水深的环境中出现,使得一些古生态学家、遗迹学家怀疑 Zoophycos 的指相意义。Osgood(1970)曾怀疑过它的有效性, Frey 和 Pemberton(1985)把 Zoophycos 的产状概括为滨海到半深海的、不同程度缺氧的静水环境。(8)Nereites 遗迹相是深海环境中,在松软的沉积物底质上所产生的遗迹化石组合。由于海水较深,海底光照减弱,含氧量降低,有机质主要靠浊流或远洋沉积物供给,为了有效地摄取沉积物表面或表层中的有机质,底栖造迹生物所产生的遗迹往往为复杂的觅食移迹(Helminthoidea, Cosmorhaphis)、设计巧妙的进食-居住迹(Paleodictyon)或弯曲的粪球粒埋铸物(Neonereites)。Nereites 遗迹相往往与复理石的沉积作用有关。Seilacher(1962)把 Nereites 遗迹相解释为浊流沉积前的遗迹群落,它们在遭受了轻微的侵蚀作用之后,由于突然埋葬而作为半浮雕(*semirelief*)埋铸物保存在上覆的浊流沉积物底面上;而 Zoophycos 遗迹相则属于浊流沉积后的遗迹化石组合。Wetzel(1983, 1984)在研究菲律宾苏禄海深海沉积物中的遗迹时发现, Nereites 遗迹相中的 Protopaleodictyon 和 Zoophycos 出现在同一个岩芯中,前者代表充氧条件较好的上阶层(*upper tier*)遗迹,而后者则为贫氧条件下产生的下阶层(*lower tier*)遗迹,在这一意义上,产生属于 Nereites 遗迹相的 Protopaleodictyon 的海水深度并不比 Zoophycos 遗迹更深。(9)深海遗迹相(*Deep-sea ichnofacies*)由 Ekdal 和 Berger(1978)提出,由内栖动物所产生的深海遗迹相,主要产于离陆地很远的,以连续的远洋沉积作用为特征的块状深海沉积中。在这一环境中,由于连续的沉积作用,抑制了层面的形成,使得在海底表面所产生的遗迹,由于被随后的沉积作用所埋葬,并被内栖动物的生物扰动所破坏而难以保存下来,只有那些产于沉积物深处和最后产生的遗迹得以保存下来。深海遗迹相主要由 Chondrites, Planolites, Teichichnus 和 Zoophycos 所组成,它与 Seilacher 的 Nereites 遗迹相的区别在于后者主要产于浊流序列中,主要由产于沉积表面的遗迹所组成。

在运用遗迹相分析进行环境解释时,必须同时考虑其它因素,如生物相和岩相特点。笔

者在研究西藏南部的白垩系和第三系的遗迹化石时发现,遗迹化石组合面貌随着沉积古环境的变化而变化,从早白垩世 *Neocomian* 到晚白垩世末 *Masstrichtian* 及早第三纪古新世早期,印度板块北部边缘经历了从盆地、陆架边缘、浅海陆架到滨海的演变历程,与此相应的是,在不同的沉积环境下,出现了不同的遗迹化石组合,分别与 *Seilacher* 的 *Nereites* 遗迹相、*Zoophycos* 遗迹相、*Cruziana* 遗迹相和 *Skolithos* 遗迹相相当(周志澄等,1992)。值得注意的是,在 *Zoophycos* 遗迹相中,可分辨出 *Zoophycos-Chondrites* 和 *Thalassinoides-Planolites* 两个遗迹亚相,分别代表贫氧和相对富氧的含氧条件(周志澄等,1993)(表 V)。

表 V 西藏南部白垩—第三系遗迹相及其沉积环境  
Cretaceous—Tertiary ichnofacies and depositional environments in Southern Tibet

遗迹相 ichnofacies	<i>Skolithos</i> ichnofacies	<i>Cruziana</i> ichnofacies	<i>Zoophycos</i> ichnofacies		<i>Nereites</i> ichnofacies
			<i>Zoophycos-Chon-</i> <i>drites</i> subichnofa- cies	<i>Thalassinoides-</i> <i>Planolites</i> subichnofacies	
主要的遗迹化石 main trace fossils	<i>Arenicolites</i> sp. <i>Skolithos linearis</i> <i>Skolithos</i> sp.	<i>Gyrochorte</i> ? sp. <i>Fucusopsis</i> sp. <i>Teichichnus</i> sp. Leaf-shaped bur- rows <i>Chondrites</i> sp. A	<i>Zoophycos</i> sp. <i>Chondrites</i> sp. B <i>Chondrites</i> sp. D	<i>Thalassinoides</i> sp. <i>Planolites</i> sp. <i>Palaeophycus</i> sp.	<i>Taenidium</i> <i>serpentinum</i> <i>Phycosiphon</i> sp. <i>Planolites</i> <i>beverleyensis</i> <i>Planolites</i> <i>montanus</i> <i>Chondrites</i> sp. C
沉积环境	滨 海	陆 架 陆架边缘	陆架、陆架边缘 缺氧条件	陆架、陆架边缘 富氧条件	盆地

3. 关于 *Psilonichnus*(螃蟹迹)遗迹群落和 *Curvolithus*(曲带迹)遗迹相 *Psilonichnus* 遗迹群落由 Frey 和 Pemberton(1987)提出,由于它仅仅发现在更新世和全新世的沉积物或岩石中,是建立在现代环境基础上的一种遗迹群落,它只是一种理论上的遗迹相(Bromley, 1990),显然,它不能属于 *Seilacher* 的遗迹相范畴(因为 *Seilacher* 的遗迹相的概念,在时间跨度上,指寒武纪以来重现的遗迹化石组合)。

*Psilonichnus* 遗迹群落是一种独特的海相与非海相混合的、准海相交错群落(Quasimarine ecotone),在地理位置上,它发生于海洋和陆地之间的过渡地带,主要包括前滨(fore-shore)的一部分,后滨(backshore)、沙丘(dunes)、冲溢扇(washover fans)和潮上坪(supratidal flats)等。*Psilonichnus* 遗迹群落向海方向过渡为 *Skolithos* 遗迹群落,向陆地方向,则过渡为 *Scoyenia* 遗迹群落。在上述过渡地带,在大潮和风暴涌浪期间,海水的作用往往是主要的,在一些冲溢扇的远端可遭受到相邻的障壁岛后的盐沼或其它海湾水体的潮水洪水作用;而在小潮和非风暴期间,海洋的风成作用往往占主导地位。除此之外,还可受到雨水的影响。过渡地带的沉积环境比较复杂,因此,在能量水平、沉积类型、机械和生物成因的沉积构造方面,变化较大。

*Psilonichnus* 遗迹群落以非水底(nonaquatic)的、但具有明显海相面貌的遗迹为特征,除了螃蟹所产生的遗迹之外,还包括各种植物的根迹、无脊椎动物以及脊椎动物中的两栖



类、爬行类、鸟类和哺乳类所产生的遗迹,其类型有无衬壁的 J、Y 形成 U 形的栖居迹、爬行迹、足辙迹、牧食迹和表面的水平通道等。

*Curvolithus* 遗迹相最早由 Lockley 等(1987)所提出,主要由沉积物表面下的移迹、进食迹(*Curvolithus*, *Margaritichnus*, *Planolites*, *Muensteria*, *Gyrochorte* and *Scolicia*)和少数沉积表面的休息、进食和居住迹(*Lockeia*, *Micatuba*, *Arenicolites*)等组成。*Curvolithus* 遗迹相反映一种非常特殊的沉积条件:砂质底质,沉积速率比较高(超过侵蚀速度),低能。它主要产于受淡水影响的边缘海环境,在石炭系和侏罗系的扇三角洲沉积中比较丰富,同时,在低能的开放陆架中,它也可以产出(如果是砂质底质)。在横向分布上,*Curvolithus* 遗迹相往往与高能的 *Skolithos* 遗迹相相邻。由于 *Curvolithus* 遗迹相分布的相带比较窄,因此,它具有重要的指相意义。

Lockley 等(1987)并没有把 *Curvolithus* 遗迹相与 *Skolithos*, *Cruziana* 和 *Zoophycos* 等遗迹相相提并论,笔者认为,*Curvolithus* 遗迹相只是属于 *Cruziana* 遗迹相中的一个次一级分类单位。

4. 遗迹化石的阶层(tier)分析 根据 Wetzel(1991)的定义,在一定的深度间隔内,同时产生的、彼此切割的遗迹即为一个阶层(tier)。

从插图 1 的岩芯复原图上,可以划分出 5 个阶层,反映了原始沉积环境的丰富的底部食物含量、高沉积速率( $>20\text{cm}/10^3\text{年}$ )和充足的充氧水平。根据 Wetzel(1991)的研究,生物成因的沉积构造在以下 6 个方面,具有重要意义:(1)掘穴的穿透深度与含氧量、底部食物含量及沉积速率成正比;(2)遗迹化石垂直分层(tiering)的数量降低,反映含氧量的减少;而垂直分层的增加,反映沉积速率及底部食物含量的增加;(3)含氧量减少,掘穴口径降低;当底部食物含量增加时,掘穴口径有可能增加;当沉积速率增加时,掘穴口径有可能变化;(4)当含氧量减少时,生物扰动程度降低;(5)掘穴壁的类型主要与底质的强度,其次与空隙水的充氧水平有关。在泥质的、比较稳定的底质条件下,往往产生没有衬壁的掘穴,而具粘液质衬壁和球粒衬壁的掘穴,往往反映砂质的、不稳定的底质条件;(6)造迹生物用身体附肢在挖掘、消化,向两侧压迫或向外排出时,所搬运的沉积物类型可以帮助我们了解底质的强度和颗粒的大小。

一般来说,从钻孔中所采取的岩芯的体积是有限的,不可能像在野外露头上那样,可以在比较大的范围内收集遗迹化石的有关资料,因此,阶层分析,对于从钻孔岩芯中获取我们所需的环境信息和生态信息,具有更重要的意义。

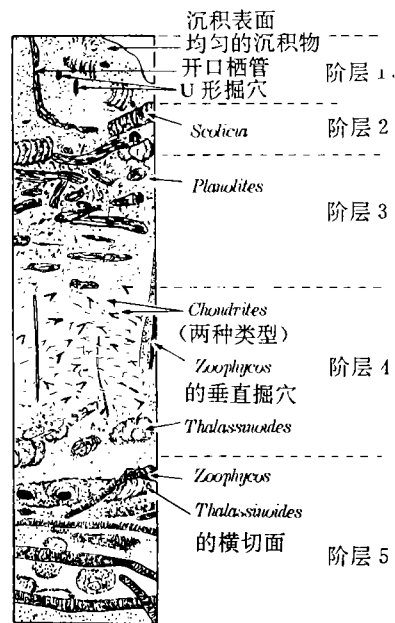


插图 1 非洲西北的现代深海沉积物中的生物成因构造的垂直分层(据 Wetzel, 1991)

Tiering of biogenic sedimentary structures in modern deep-sea deposits of NW Africa (after Wetzel, 1991)

### 三、生物成因的构造对几种环境指标的解释

#### (一)沉积速率(sedimentation rate)

了解沉积物的沉积速率,对于帮助我们分析沉积环境,有着重要意义。运用生物成因的构造来分析沉积物的沉积速率,主要可以通过以下两个方面

1. 遗迹化石本身的构造特征,特别是逃逸迹,可以提供有关沉积速率的重要信息:当沉积环境以沉积作用为主时,产生后退式蹼状构造(retrusive spreiten);当沉积环境以侵蚀作用为主时,则产生前进式蹼状构造(protrusive spreiten)。Goldring(1962)所举的英国上泥盆统 Baggy 层中 *Diplocraterion parallelum* (平行双杯迹)的例子,很好地反映了遗迹构造的变化过程与沉积作用和侵蚀作用之间的关系(插图 2)。

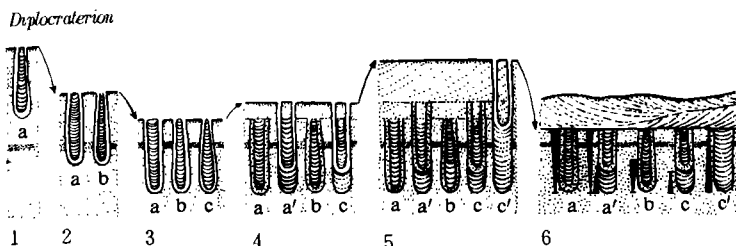


插图 2 *Diplocraterion parallelum* 随着侵蚀作用和沉积作用周期性交替所产生的变化(Ekdale *et al.*, 1984 据 Goldring, 1962 改编)

*Diplocraterion parallelum* in depositional settings where episodic sedimentation alternates with periodic erosion (Modified by Ekdale *et al.*, 1984 after Goldring, 1962)

1. 侵蚀作用为主,栖管 a 为前进式蹼状构造;2. 强烈的侵蚀作用,侵蚀面上,产生新的栖管 b,栖管 a, b 均为前进式蹼状构造;3. 侵蚀作用继续,侵蚀面上产生新的栖管 c,栖管 a, b, c 均具有前进式蹼状构造;4. 沉积作用为主,栖管 a, b 废弃,栖管 a', c 向上移动,产生后退式蹼状构造;5. 快速的堆积作用,栖管 a, a', b, c 均遭废弃,栖管 c' 迅速向上移动,产生后退式蹼状构造;6. 强烈的侵蚀作用,栖管 a, a', b, c, c' 均遭废弃,侵蚀面被后来的砂质沉积物所覆盖。

2. 运用生物扰动及其组构特征来分析沉积速率的变化。在适当的生态环境中,当沉积作用缓慢而连续地进行时,造迹生物有充分的时间进行生物扰动,形成完全的生物扰动组构;当沉积速度太快时,生物活动受到了抑制,在后一种情况下,沉积物中往往缺乏生物扰动构造。Howard(1978)曾运用生物扰动组构特征来分析沉积速率的变化情况(插图 3)。

为了定量地分析生物扰动的强度,Droser 等(1986)曾提出一种遗迹组构(ichnofabric)的快速鉴定卡(flash cards),把生物扰动(从缺乏生物扰动到完全的生物扰动)划分成 5 种等级。当我们运用生物扰动组构来分析沉积速度的变化时,要注意其它的沉积特征和沉积物中所含的实体化石,有时候,缺乏生物扰动构造并不是完全由于快速沉积作用所造成,如在缺氧的还原环境下所沉积的沉积物中,由于原始的沉积环境不适宜生物生存,因而缺乏生物扰动构造(如西藏岗巴地区晚 Aptian 到早 Albian 的黑色页岩中,就完全缺乏生物扰动构造);另一种情况,当沉积物表面和内部含有丰富的底栖和内生生物时,由于强烈的生物扰动,可以造成沉积物的均一化,使得沉积物中的生物扰动构造很难分辨,表面上看来,这样的沉积物似乎也缺乏生物构造。还有一种情况是,最初产生的生物扰动构造由于后来的侵蚀作用而没有保存下来,这些因素都是值得我们注意的。

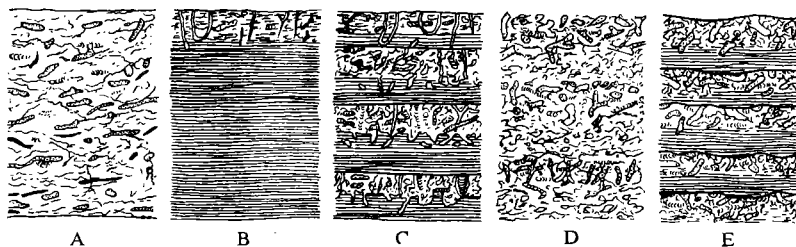


插图 3 在不同沉积环境下产生的生物扰动和组构(Ekdale *et al.*, 1984 据 Howard, 1978 改编)

Bioturbation and fabric in different depositional settings (Modified by Ekdale *et al.*, 1984 after Howard, 1978)

- A. 缓慢、连续的沉积作用,生物扰动速率等于或超过沉积作用速率;
- B. 迅速的沉积作用(或者在缺氧条件下的沉积作用),动物的活动受到抑制,生物扰动从沉积单元顶部的沉积间断面向下延伸;
- C. 快速沉积作用与伴随有侵蚀作用的缓慢沉积作用的交替,注意在侵蚀表面的掘穴的截顶作用;
- D. 缓慢、不连续但没有侵蚀作用的沉积作用,在沉积作用停止期间由动物所产生的一组停积遗迹化石显示出很难分辨的停积面,沉积作用阶段有利于不同的动物群落和行为方式。
- E. 沉积作用和侵蚀作用韵律性地交替出现,注意被截顶的掘穴。

## (二)含氧量(oxygenation)

近年来,许多遗迹学家和古生态学家运用生物成因构造对原始沉积环境进行含氧量分析作了大量工作,取得了很大进展。

不同造迹生物生态习性的差异,使得它们对生活环境中的含氧量(包括水/沉积物界面以上底水中的含氧量和沉积物粒间水中的含氧量)有不同要求,有些造迹生物只能在富氧环境里生活,而有些造迹生物则对贫氧条件具有较强的忍受能力,这种差异,正是我们运用生物成因的构造来分析和判断原始沉积环境含氧条件的主要依据。

1. 遗迹化石生态分类与含氧量之间的关系 造迹生物的觅食方式和生态习性与它们所生活的环境的含氧条件之间,有着密切的联系。滤食生物主要从扰动的水体中摄取微生物和其它营养物质,因此,以居住迹为主的遗迹化石共生(如 *Skolithos* 和 *Arenicolites*)往往反映一种富氧环境。有些造迹生物在海底表面或沉积表面之下的沉积物中觅取可消化的有机质,一方面,这种觅食方式要求沉积环境中的含氧量不宜过高,在富氧条件下,沉积物中所含的有机质易于氧化分解而不易保存;另一方面,在沉积表面之下觅食的造迹生物,依靠沉积物粒间水中溶解的氧进行呼吸,因此,这类造迹生物要求沉积物具有较高的渗透率和粒间水中含有一定数量的氧。在这一环境下所产生的遗迹化石有 *Scalarituba*, *Spirophyton* 和 *Phycosiphon* 等。有一些进食迹的造迹生物从沉积物深部取食,当它们从沉积表面向下掘穴取食时,它们的掘穴系统与底水/沉积物界面保持着连通,生物呼吸所需的氧主要依靠流进掘穴系统内的海水中所含的氧供给,具有这种生态功能的造迹生物对沉积物粒间水中的缺氧条件具有较强的忍受能力,*Chondrites* 和 *Zoophycos* 的造迹生物即属于此类。

Ekdale 和 Mason(1988)曾详细描述了遗迹化石共生与含氧量(包括海底水和沉积物粒间水中的含氧量)之间的关系(插图 4),我们可以利用这一规律来帮助判断原始沉积环境的含氧量情况。

2. 利用遗迹化石的分异度来分析含氧条件 一般来说,富氧环境下所产生的遗迹化石类型比较丰富,分异度较高,它不仅包括那些通常在富氧环境下才出现的遗迹化石类型,而

且也可出现那些对于贫氧条件具有较强忍受能力的遗迹化石分子。随着含氧量的逐渐降低,遗迹化石类型逐渐变得单调,分异度降低,最后只剩下对缺氧条件忍受能力最强的遗迹化石类型,如 *Chondrites* (表Ⅲ)。因此,我们可以利用遗迹化石的分异度来分析、判断原始沉积环境的含氧量。

3. 遗迹化石的阶层(tier)分析 对于同一种遗迹化石来说,它的口径大小、钻透深度,随着含氧量的降低而减小,当沉积物中出现穿透较深,而与沉积表面又没有永久性开口的遗迹化石时,表明原始的沉积物具有较高的渗透率和沉积物粒间水中含有较充分的氧。

另一方面,遗迹化石的形态特征,也能反映原始环境中的含氧条件,*Zoophycos* 在充氧条件较好的环境中,往往只具有一种简单的 J 形管,而在贫氧条件下,经常发现 *Zoophycos* 在海水/沉积物界面上具有两个开口,形成一个 U 形管体系 (Wetzel *et al.*, 1981),后一种形态构造使造迹生物更易于从循环的海水中吸取氧。

(三)能量级别(energy level)

沉积环境对造迹生物的生态习性具有重大影响,在不同能量级别的环境中,造迹物所产生的遗迹和生物扰动构造具有不同的特点:在浅水扰动带,温差、盐度等环境因素变化较大,遗迹生物以滤食为主,在这种环境下,造迹生物往往建造坚固的垂直的掘穴或栖管,它们可以为造迹生物提供一个比较稳定的居所,而垂直的构造则有利于水体的循环;在相对较深的平静的水体中,环境比较稳定,温差、盐度等环境因素变化较小,造迹生物以食泥生物为主,所产生的遗迹和生物扰动构造,以水平分布为主,往往缺乏坚固的管壁。因此,掘穴的大小、形态、结构构造等特征,对于帮助我们了解原始沉积环境的能量高低,具有一定的意义。

对于同一种遗迹化石来说,在不同的沉积环境中,它们的形态特征也不尽相同,我国安徽东部巢县凤凰山和州组顶部所产的 *Thalassinoides* (海生迹) (图版 I, 图 5) 垂直系统发育,反映了一种浅水、高能的潮间带环境(周志澄等, 1991); 在西藏南部岗巴上白垩统宗山组中所发现的 (*Thalassinoides*) 则以水平的掘穴体系为主,反映了一种较深水的低能的水动力条件。

有时,根据特征的遗迹化石,可以帮助我们判别水体的能量级别,最典型的例子是 *Ophiomorpha* (蛇形迹) (图版 I, 图 4)。 *Ophiomorpha* 广泛地出现于从晚古生代到现代的各种环境里 (Ekdale, 1988), 决定 *Ophiomorpha* 分布的因素既不是水深、盐度和含氧量,甚至也不是沉积物成分 (*Ophiomorpha* 可产于陆源碎屑和碳酸盐沉积物中), 决定 *Ophiomorpha* 产状的真正因素是能量条件和底质结构的稳定性。 *Ophiomorpha* 总是出现在高能条件下所沉

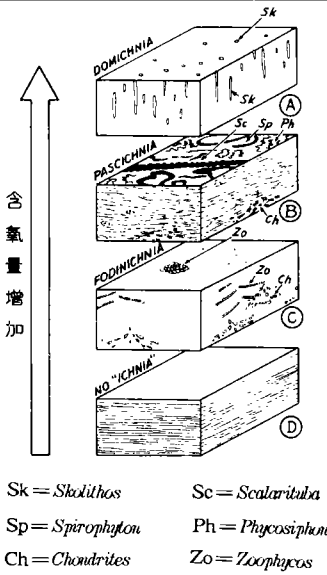


插图 4 与氧有关的遗迹化石共生的总的模式(据 Ekdale and Mason, 1988)  
General model of oxygen-dependent trace-fossil associations (after Ekdale and Mason, 1988)

- A. 以居住迹为主的共生产于富氧的底水和粒间水(完全充氧)的环境;
- B. 以觅食迹为主的共生产于底水为富氧或贫氧、粒间水为贫氧(充氧很差)的环境;
- C. 以进食迹为主的共生产于底水为富氧或贫氧、粒间水为缺氧的环境;
- D. 无生命环境(主要为层纹状沉积物),底水和粒间水均为缺氧环境。

积的清洁的砂里(通常细到中粒砂),具有不稳定的底质条件。Kern 和 Warne(1974)所举的例子或许最能说明 *Ophiomorpha* 与沉积环境的能量条件之间的关系。在南加利福尼亚上白垩统的砂岩和泥岩交替的浊流沉积物中,球粒状的 *Ophiomorpha* 出现在砂岩中,而光滑壁的 *Thalassinoides* 则分布于层间泥层中。*Ophiomorpha* 和 *Thalassinoides* 在成因上有着密切联系,它们均由同一类造迹生物(可能为十足纲甲壳目)所造成,它们在不同的沉积物中出现,是与原始沉积环境中的能量条件有关;前者产生于高能条件下;后者则与低能条件有关。

#### (四)底质(substrates)

底质的成分、结构、稳定性和硬度是影响海底生物的类型和它们行为习性的一个重要因素,同时,底质类型也是划分遗迹相的重要参数(表 IV),我们可以利用生物成因的构造,了解底质类型,从而帮助恢复原始的沉积环境。

生态学家和遗迹学家根据底栖生物所栖居的底质划分为 5 种不同的类型:

1. 汤底(soupground) 由含水太多的沉积物所组成的底质。由于沉积物中含水太多,以至于用手捞起一把沉积物时,沉积物会从人们的手指缝里流出。

2. 软底(softground) 介于半硬底和汤底之间,松软的、未固结的沉积底质,这些松软的沉积物可以从一个人的手指缝里挤出来。

3. 半硬底(firmground) 由变硬的、但未胶结的沉积物组成的底质。半硬底一般在暴露于海底的停积面(omission surface)上形成,有时,从沉积表面向下,随着压实作用的增强,沉积物的密度(consistance)逐渐增加,从类似于软底的底质(softground-like)过渡到类似于半硬底的底质(firmground-like),这种在沉积表面之下、没有暴露于海底表面的半硬底称之为隐性半硬底(concealed firmground)。

4. 硬底(hardground) 由已经胶结、硬化的岩石所组成的底质。硬底通常发生在停积面(omission surface)上,这种底质条件,掘穴生物难以穿透,但可产生钻孔遗迹。

5. 木底(woodground) 由木质所组成的底质。木底一般发生在滨海或浅海环境下,在这种底质上,可以产生钻孔遗迹。

不同的遗迹化石类型往往反映不同的底质条件,如 *Ophiomorpha* 往往与不稳定的底质条件有关,在不稳定的砂质底质上,造迹生物用球粒加固掘穴壁,使得掘穴不易垮塌,相比之下,与 *Ophiomorpha* 同一类造迹生物所产生的 *Thalassinoides* 则往往与较稳定的底质条件有关。

与底质有关的生物成因构造的另一个例子是安徽东部巢县和州组顶部,密集的 *Thalassinoides* 在潮间带潮坪的停积面上产生,反映了一种半硬底(firmground)的底质性质(周志澄等,1991)(图版 I, 图 5);在南京孔山和州组顶部由 *Planolites* 所造成的蜂窝状构造,则反映了一种软底(softground)的底质条件,形成于潮下低能环境(图版 II, 图 2)。

在许多内生动物群落所产生的阶层(tiered)构造里,影响遗迹群落垂直分布的因素,除了沉积物粒间的含氧水平之外,还受到沉积物密度的影响,在大多数情况下,随着埋藏深度的增加,沉积物粒间的含氧量逐渐降低,沉积物密度逐渐增加,底质性质从汤底—软底—半硬底向着硬底变化,由于大多数遗迹化石是受底质控制的,因此,在垂直剖面上,它们分布在不同的阶层上。

Bromley 和 Ekdale(1986)描述过不同地质背景下的阶层遗迹群落的几个例子,它们显

示出不同类型的掘穴之间的切割关系,这可以使得遗迹学家得以重建最初的内生群落的阶层构造,不同遗迹化石的几个阶层,在一个复杂的遗迹组构里,彼此叠置,在这样一种组合里,这种叠置的掘穴产于海底之下的不同带,因此,真正地代表不同的底质条件。

在北欧上白垩统陆架海白垩中,底质对内生动物的遗迹群落的控制是相当明显的,这种细粒的钙质软泥,完全地被生物扰动了,从上白垩统复合的遗迹组构里,至少可以分辨出5个阶层的掘穴,最上的遗迹由最浅的掘穴生物双壳类和棘皮类所产生,这类遗迹由于容易被较深掘穴的内生动物的活动所破坏,常常难以保存下来。由浅而深,依次为 *Planolites*, *Thalassinoides*, *Zoophycos* 和 *Chondrites*。*Planolites* 的造迹生物倾向于接近于海底水/沉积物界面的汤底或软底;而 *Zoophycos* 和 *Chondrites* 的造迹生物倾向于相当硬的(压实的和脱水的)沉积底质,在沉积表面之下相当深的地方。

### (五)含盐度(salinity)

盐度是控制生物分布的主要因素,由生物活动所产生的遗迹的类型、丰度和分异度等同样也受到盐度的控制,利用生物成因的构造进行含盐度分析,主要从下列几个方面来考虑:

1. 遗迹化石的分类学研究 有些遗迹化石种只出现在非海相环境,如 *Scoyenia gracilis*, *Ancorichus coronus* 和 *Fuersichnus communitis*,对它们的分类学研究,有助于了解原始沉积环境的含盐度。

2. 遗迹群落的遗迹相研究 60年代以来,遗迹学家对于不同盐度的环境(陆相、海陆过渡相和海相)建立了不同的遗迹群落和遗迹相。虽然陆相环境与海相一样复杂,但由于对陆相环境中遗迹化石的研究程度远不如海相环境,所以,迄今为止,只建立了一个陆相环境的遗迹相:*Scoyenia* 遗迹相(Seilacher, 1964, 1967)。*Scoyenia* 遗迹相主要反映的是盐度,而不是水深。Bromley 和 Asgaard(1976)根据对格陵兰东部三叠系 Fleming Fjord 组的研究,按照水深分布,划分出以下4个组合:*Fuersichnus* 遗迹组合,代表相当稳定,但比较深的湖泊环境;*Arenicolites* 遗迹组合,浅的湖相环境;*Scoyenia* 遗迹组合,代表湖泊边缘,遭受周期性干燥的、非常浅的水底条件;*Rusophycos* 遗迹组合,标志着湖相条件的结束和干燥的河流环境。随着研究程度的逐渐深入,像海相环境一样,在陆地淡水环境中将来也可能建立起一系列反映不同环境的遗迹相类型。

海、陆过渡相的环境变化比较大,水体中含盐度的多少取决于多种因素(如淡水的注入量,海水的影响,蒸发量等),前面提到的 *Culvolithus* 遗迹相对于帮助我们解释过渡相和浅海陆架相中一种比较特殊的沉积环境具有一定的意义。

典型的海相环境中的遗迹相有 *Skolithos*, *Glossifungites*, *Trypanites*, *Cruziana*, *Zoophycos*, *Nereites* 和 deep-sea 遗迹相。*Teredolites* 遗迹相在海相和过渡相环境中都可出现。

3. 遗迹化石和生物扰动构造的特征、丰度及分异度也可以在一定程度上提供有关沉积环境含盐度的一些线索。Ekdale(1988)曾用图表示遗迹化石分异度与含盐度之间的关系,在淡水环境,遗迹化石的分异度中等;在半咸水环境,低;在正常海相环境,高到非常高;在超盐度环境中,非常低。以盐度为基础的遗迹分异度的倾向与以盐度为基础的生物种的分异度的倾向相似。Howard(1975, 1978)在研究了沿着现代的乔治海岸的海湾系统,发现清楚保留的掘穴的分异度向海方向增加,完全生物扰动(由于生物扰动造成沉积物的完全均一化)向陆

地方向增加。Miller(1984)的研究得出了有关不同盐度条件下遗迹化石分异度的相类似结论,在研究了非海相—海相的过渡序列,特别在美国东部宾夕法尼亚韵律层的遗迹化石组合后发现,遗迹化石的分异度在河流相中中等,在半咸水相中,低到缺少,在滨海相中非常高。Frey 和 Basan(1978)曾描述过乔治海岸现代盐沼中生物成因构造的特点,盐沼沉积物遭到强烈改造,不仅有无数的动物掘穴(掘穴生物包括多毛类、泥蟹和招潮蟹),而且还有丰富的根穿透构造。

#### 四、运用生物成因的构造解释环境时值得注意的问题

1. 在运用遗迹化石来解释环境的绝对水深时,主要通过遗迹化石的组合面貌,而不是个别的遗迹化石分类单位。要注意把特殊的遗迹属与遗迹相本身的概念区别开来,特别是那些命名的遗迹属和遗迹相本身,如 *Skolithos* 遗迹属可以在河流相、潮间带、半深海甚至深海沉积物中出现,但 *Skolithos* 遗迹相仅仅代表滨海具有松软底质的沉积环境。另一方面,以某种遗迹属命名的遗迹相的鉴定,并不意味着该遗迹属一定要出现在遗迹组合里,如 *Cruziana* 遗迹相的鉴定,不一定要有 *Cruziana* 的出现,因为在大多数情况下,*Cruziana* 主要由三叶虫所产生,虽然三叶虫在古生代末就已绝灭,*Cruziana* 遗迹相可以出现在古生代和古生代以后的沉积中。

2. 有些遗迹化石在不同的地史时期,分布的深度发生过很大变化,因此,在不同的地质时代,它们具有不同的环境意义。如 *Zoophycos* 在晚古生代,常常出现在浅水环境(Osgood and Szmuc, 1972; Yurewicz, 1977),但是,在中生代,*Zoophycos* 很少出现在浅水环境,而在新生代,还没有发现真正浅水相的 *Zoophycos* (Ekdale, 1978; Bottjer *et al.*, 1987)。在我国不同地质时代的地层中所出现的 *Zoophycos*,也发现有类似的情况,据杨式溥(1984b)报道,在我国华北晚石炭世浅海沉积中(太原组灰岩)就广泛分布有 *Zoophycos*;而在西藏南部白垩纪 Albian 晚期,*Zoophycos* 则主要出现在陆架和陆架边缘环境中(周志澄等, 1992)(图版 1, 图 2),因此,当我们用 *Zoophycos* 作为环境指标来解释环境时,必须注意所在地质时代的时代。

3. 由于某种或某些环境因素的变化,导致遗迹群落在纵向上的变化,这一现象可以用生态学的概念来解释。Pianka (1970)曾详细描述过机会主义种(r-选择)(opportunistic species)和均衡种(k-选择)(equilibrium species)的特点。机会主义种包括那些繁殖速率和生长速率高,对生态环境的适应性强,具有广泛觅食习惯的那些生物,它们在一个主要的和突然的环境变化(如风暴沉积)之后,能够对一个没有开发的生境迅速作出反应,迅速地占领并聚居在新的栖息地,或者能在高度恶劣的环境(如海滩)或物源贫乏的环境(如饥饿盆地(starved basin)里繁衍。机会主义种的个体具有高丰度、低分异度和生命期短的特征。与机会主义种相比,均衡种的繁殖速率和生长速率低,对环境的适应能力差,它们具有专门的觅食习惯,在海洋范围内,均衡种倾向于狭水深、狭温和狭盐,其特点是分异度高,但是居群(population)的密度总的来说是低的,没有一个分类单位在组合中占有主导地位。

在遗迹学中,同样可划分为机会主义遗迹化石和均衡遗迹化石两种,为了与均衡迹(*Equilibriumichnia*)相区别,Bromley(1990)把后者称之为高峰遗迹化石(climax trace fossils)。

Pemberton 和 Frey(1984)描述了加拿大阿尔培泰上白垩统 *Cardium* 组中所出现的两种独特的、互层的遗迹化石共生,一种以 *Skolithos*, *Diplocraterion* 和 *Ophiomorpha* 为代表的

遗迹组合,产于清洁的、丘状的、具有交错层构造的砂层中,它们显然产于风暴事件中;另一种遗迹组合以含有 *Chondrites*, *Cochlichnus*, *Cylindrichnus*, *Gyrochorte*, *Muensteria*, *Palaeophycus*, *Phoebichnus*, *Planolites*, *Rhizocorallium*, *Rosselia*, *Thalassinoides* 和 *Zoophycos* 等分异度高的遗迹组合为特征,产于泥层中,表示沉积于安静的、无风暴的间隔中,前者为机会主义遗迹群落,属于典型的 *Skolithos* 遗迹相,后者为均衡群落,属 *Cruziana* 遗迹相。这两种遗迹群落在剖面中的交替出现,不是由于水深的变化,而是由沉积环境中高能与低能的交替变化所引起,类似的遗迹群落的交替在德国基德湾(Dorjes, 1978)潮坪沉积中也曾出现,它们由水流和波浪作用的增强或减弱所造成。

沉积环境中含氧量的变化,同样也可造成遗迹群落的变化,当沉积环境由缺氧条件向贫氧条件转变时,首先出现的是对低含氧量具有较强忍受能力的 r-选择的遗迹化石组合,它们一下子占领了这一未开发的生境,并繁盛起来,产生一个密度很高,但分异度低的遗迹群落(主要由 *Chondrites* 和 *Zoophycos* 组成);当沉积环境逐渐向富氧条件转化, k-选择的均衡遗迹化石分子逐渐繁盛起来,产生一个密度不很大,但分异度较高的遗迹化石群落如 *Planolites*, *Thalassinoides* 和 *Palaeophycos* 等)。当沉积环境由富氧向贫氧转变时,从地层剖面中首先消失的是均衡遗迹化石(k-选择)分子,而机会主义遗迹化石(r-选择)的分子最后从地层剖面中消失,与上述风暴和波浪所造成的遗迹群落交替一样,这种遗迹群落的变化,不是由水深的变化所引起,在后一种情况下,是由于含氧量的改变所造成。

因此,在实际工作中,当我们发现,遗迹化石的组合面貌发生了突然变化,首先必须仔细分析这种变化的原因,而不是轻易地把这种变化归结于水深的变化。

4. 环境分析是项复杂的系统工程,当我们对沉积体进行环境分析时,不仅要利用生物成因的构造所提供的各种环境信息,而且,要注意非生物成因(机械成因)的结构、构造和古生物学方面的资料(实体化石)的环境意义;如果生物成因的构造产于碳酸盐沉积中,生物成因构造的研究,结合碳酸盐微相分析,可以使得我们所得出的环境分析结论更可信。除此之外,对沉积盆地的大地构造背景的了解和对地球化学方面资料的分析,同样是我们分析沉积环境的重要依据。

## 参 考 文 献

- 吴贤涛, 1985: 豫西济源-义马盆地浊流沉积中的痕迹化石及其环境意义. 沉积学报, 3(3): 23—31.
- 李广雪、薛春汀, 1992: 黄河三角洲的生物逃逸沉积构造. 沉积学报, 10(2): 88—93.
- 周志澄、张 瑛, 1991: 安徽巢县凤凰山和州组上段 *Glossifungites* 遗迹相的成因及其意义. 沉积学报, 9(4): 120—127.
- 周志澄、章炳高, 1992: 西藏南部白垩系及下第三系的沉积特征及其环境意义. 中国青藏高原研究会第一届学术讨论会论文集. 280—286 页. 科学出版社.
- 周志澄、章炳高, 1993: 西藏南部白垩系遗迹相及其环境意义. 中国古生物学会第十七届学术年会论文摘要. 中国科学院南京地质古生物研究所编辑.
- 杨式傅, 1984a: 遗迹化石及其古环境分析的意义. 沉积学报, 2(4): 8—18.
- 杨式傅, 1984b: *Zoophycos* 在中国的发现及其环境意义. 石油与天然气地质, 5(3): 228—235.
- 杨式傅, 1989: 广州花县晚泥盆世和早石炭世遗迹化石. 地球科学——中国地质大学学报, 14(6): 573—580.
- 胡 斌、王观忠, 1992: 痕迹相模式及其应用评价. 煤田地质与勘探, 2(2, 3): 10—15; 6—11.
- 晋慧娟、李育慈, 1991: 准噶尔盆地晚古生代深水斜坡沉积中的遗迹相及其环境分析. 中国科学, B 辑, (4): 408—415.
- Ausich, W. I. and Bottjer, D. J., 1982: Tiering in suspensionfeeding communities on soft substrata throughout the



- phanerozoic. *Science*, **216**:173—174.
- Bottjer, D. J., Droser, M. L. and Jablonski, D., 1987; Bathymetric trends in the history of trace fossils. in Bottjer, D. J. (ed), *New concepts in the use of biogenic sedimentary structures for paleoenvironmental interpretation*. Los Angeles: Pacific Section SEPM. p. 57—65.
- Bromley, R. G., 1990; *Trace Fossils——Biology and Taphonomy*. Unwin, Hyman, London.
- Bromley, R. G. and Ekdale, A. A., 1984; *Chondrites*: a trace fossil indicator of anoxia in sediments. *Science*, **224**: 872—874.
- Bromley, R. G. and Ekdale, A. A., 1986; Composite ichnofabrics and tiering of burrows. *Geol. Mag.*, **123**(1): 59—65.
- Curran, H. A. (ed), 1985; *Biogenic Structures: Their Use in Interpreting Depositional Environments*. SEPM Spec. Pubs. 35.
- D'Alessandro, A., Ekdale, A. A., and Sonnino, M., 1986; Sedimentologic significance of turbidite ichnofacies in the Saraceno Formation (Eocene), southern Italy. *Jour. Sed. Petrol.*, **56**: 294—306.
- Dorjes, J., 1978; Das Watt als Lebenstraum. in Reineck, H. E., (ed.), *Das Watt*; Kromer, Frankfurt. p. 107—143.
- Dorjes, J. and Hertweck, G., 1975; Recent Biocoenoses and ichnocoenoses in shallow-water environments. in Frey, R. W. (ed), *The Study of Trace Fossils*. New York, Springer-Verlag, p. 459—491.
- Droser, M. L. and Bottjer, D. J., 1986; A semiquantitative classification of ichnofabric. *Jour. Sed. Petrol.*, **56**: 558—569.
- Ekdale, A. A., 1978; Trace fossils in Leg 42A cores. *Initial Repts Deep Sea Drilling Project*, **42**: 821—827.
- Ekdale, A. A., 1985; Paleocology of the marine endobenthos. *Palaeogeogr.*, *Palaeoclimatol.*, *Palaeoecol.*, **50**: 63—81.
- Ekdale, A. A., 1988; Pitfalls of paleobathymetric interpretations based on trace fossil assemblages. *Palaio*, (3): 464—472.
- Ekdale, A. A., and Berger, W. H., 1978; Deep-sea ichnofacies: modern organism traces on and in pelagic carbonates of the western equatorial Pacific. *Palaeogeogr.*, *Palaeoclimatol.*, *Palaeoecol.*, **23**: 263—278.
- Ekdale, A. A., Bromley, R. G. and Pemberton, S. G., 1984; *Ichnology*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Tulsa, Oklahoma.
- Ekdale, A. A. and Mason, T. R., 1988; Characteristic trace-fossil associations in oxygen-poor sedimentary environments. *Geology*, **16**: 720—723.
- Frey, R. W. (ed), 1975; *The Study of Trace Fossils*. Springer-Verlag, New York.
- Frey, R. W. and Basan, P. B., 1978; Coastal salt marshes. in Davis, R. A. (ed), *Coastal sedimentary environments*. Springer-Verlag, New York, p. 101—169.
- Frey, R. W. and Howard, J. D., 1970; Comparison of Upper Cretaceous ichnofaunas from siliceous sandstones and chalk. Western Interior, U. S. A. in Crimes, T. P. and Harper, J. C. (eds), *Trace fossils*. *Geol. Jour. Spec. issue*, **3**: 141—166.
- Frey, R. W. and Pemberton, S. G., 1985; Biogenic structures in outcrops and cores. I. Approaches to ichnology. *Bull. Canad. Petrol. Geol.*, **33**: 72—115.
- Frey, R. W. and Pemberton, S. G., 1987; The *Psilonichnus* ichnocoenose and its relationship to adjacent marine and non-marine ichnocoenoses along the Georgia coast. *Bull. Canad. Petrol. Geol.*, **35**: 333—357.
- Frey, R. W. Pemberton, S. G. and Fagerstrom, J. A., 1984; Morphological, ethological and environmental significance of the ichnogenera *Scoyenia* and *Ancorichnus*. *Jour. Paleontol.*, **58**: 511—528.
- Frey, R. W. and Seilacher, A., 1980; Uniformity in marine invertebrate ichnology. *Lethaia*, **13**: 183—207.
- Goldring, R., 1962; The trace fossils of the Baggy Beds (Upper Devonian) of North Devon, England. *Palaeontol. Zeitsch.*, **36**: 232—251.
- Hayward, B. W., 1976; Lower Miocene bathyal and submarine canyon ichnocoenose from Northland, New Zealand. *Lethaia*, **9**: 149—162.
- Howard, J. D., 1975; The sedimentological significance of trace fossils. in Frey, R. W. (ed), *The Study of trace fossils*. Springer-Verlag, New York, p. 131—146.
- Howard, J. D., 1978; Sedimentology and trace fossils in Basan, P. B. (ed), *SEPM short course no. 5*: 11—42. Tulsa:

Soc. Eon. Pal. Min.

- Kern, J. P. and Warme, J. E., 1974: Trace fossils and bathymetry of the Upper Cretaceous Point Loma Formation, San Diego, California. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **85**:893—900.
- Leymerie, M. A., 1842: Suite du memoire sur la terrain Cretace du Department de l'Aube. Societe Geologique France, *Memoires*, **5**:1—34.
- Lockley, M. G., Rindsberg, A. K. and Zeiler, R. M., 1987: The paleoenvironmental significance of the nearshore *Curvolithus* ichnofacies. *Palaos*, **2**:255—262.
- Miller, M. F., 1984: Distribution of biogenic structures in Paleozoic nonmarine and marine margin sequences; an actualistic model. *Jour. Paleontol.*, **58**:550—570.
- Osgood, R. G., 1970: Trace fossils of the Cincinnati area. *Palaeontogr. Americana*, **6**:281—444.
- Osgood, R. G. and Szmuc, E., 1972: The trace fossil *Zoophycos* as an indicator of water depth. *Bulls. Amer. Paleont.*, **62**:1—22.
- Pemberton, S. G. and Frey, R. W., 1984: Ichnology of storm-influenced shallow marine sequence, Cardium Formation (Upper Cretaceous) at Seebe, Alberta, in Stott, D. F. and Glass, D. J., (eds), *The Mesozoic of Middle North America*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, **9**:281—304.
- Pianka, E. R., 1970: On r- and k-selection. *Amer. Naturalist*, **104**:592—597.
- Seilacher, A., 1962: Paleontological studies on turbidite sedimentation and erosion. *Jour. Geol.*, **70**:227—234.
- Seilacher, A., 1964: Biogenic sedimentary structures, in Imbrie, J. and Newell, N. (eds), *Approaches to Palaeoecology*. New York: Wiley, p. 296—316.
- Selacher, A., 1967: Bathymetry of trace fossils. *Mar. Geol.*, **5**:413—428.
- Selacher, A., 1978: Use of trace fossil assemblages for recognizing depositional environments. *SEPM Short Courses*, **5**:167—181.
- Wetzel, A., 1991: Ecologic interpretation of deep-sea trace fossil communities. *Palaeogeogr.*, *Palaeoclimatol.*, *Palaeoecol.*, **85**:47—69.
- Yurewicz, D. A., 1977: Sedimentology of Mississippian basin facies carbonates, New Mexico and Texas—the Rancheria formation. *SEPM Spec. Publs*, **25**:203—219.

[1993年10月20日收到]

## APPLICATION OF BIOGENIC STRUCTURES TO ENVIRONMENTAL INTERPRETATION

—ADVANCEMENT IN STUDIES OF ICHNOLOGY

Zhou Zhi-cheng

(Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica, Nanjing 210008)

**Key words:** biogenic structures, trace fossil, ichnofacies, ichnocoenose, tier, opportunistic trace fossils, equilibrium trace fossils

### Summary

Since the fifties, especially the recent two decades of this century, great progress has been made in the studies of ichnology. Biogenic structures as an important indication are widely used in environmental interpretation. This paper mainly introduces the advancement in this field, with the proposal of some problems which should be taken into careful consideration while making use of these biogenic structures.

## 1. Classification of biogenic structures

According to Frey and Pemberton (1985), biogenic structures can be divided into biogenic sedimentary structures and bioerosion structures. The former can be subdivided into bioturbation structure, biostratification structure and biodeposition structure.

## 2. Some approaches to the use of biogenic structures in environmental interpretation

(1) The ethological types of trace fossil assemblages are related to the depositional environments. For example, *Domichnia* prevails in nearshore facies, *Repichnia* and *Cubichnia* are rich in marine shelf facies, while *Pasichnia* and *Agrichnia* usually occur in deep-sea facies environments. Analysis of ethological types of trace fossil assemblages may give us general ideas about the bathymetry of the depositional environment. The changes in ethological types of Mesozoic trace fossil assemblages from Hohxil area of Qinghai, China reflect the evolution sedimentary environments from deep-sea facies through bathyal to littoral facies. The feeding structures are predominant in the Late Triassic; both feeding and dwelling structures, in the Middle to Late Jurassic, while dwelling structures, at the end of Jurassic. (2) Some typical "index" trace fossils provide information on some special environmental conditions. For example, *Chondrites* can be regarded as an anoxic indication and *Ophiomorpha* can indicate unstable substrates and high water energy conditions of original depositional environments. (3) Seilacher's ichnofacies are of theoretical and practical significance for our understanding of general bathymetry of sedimentary environments. The bathymetry, salinity and substrates of original depositional environments are the main factors controlling the distribution of trace fossil assemblages. Based on these factors, 9 ichnofacies can be recognized, namely the *Scoyenia*, *Skolithos*, *Glossifungites*, *Cruziana*, *Zoophycos*, *Nereites*, *Trypanites*, *Teredolites* and deep-sea ichnofacies. The bathymetric interpretation of ichnofacies can be exemplified by the distribution of Cretaceous ichnofacies from southern Tibet. This region was situated along the northern margin of India Plate, uplifted from deep-sea environments to nearshore environments during Neocomian to Maastrichtian. Meanwhile, in the strata from Early to Late Cretaceous were recorded the *Nereites*, *Zoophycos*, *Cruziana* and *Skolithos* ichnofacies. It should be emphasized here that the *Zoophycos* ichnofacies can be subdivided into the *Zoophycos-Chondrites* and *Thalassinoides-Planolites* subichnofacies which are representative of anoxic and oxic conditions respectively. (4) Tier analysis provides ecological and environmental information about benthic food content, oxygen content, sedimentation rate, substrate consistency, etc.

### 3. Use of biogenic structures in interpretation of some environmental factors

(1) Sedimentation rate In some cases, the structures of trace fossils reflect the sedimentation rate of original depositional environments. The regressive spreite structures of trace fossils result from rapid sedimentation. In contrast, the protrusive spreite structures of trace fossils take form when the erosion rate exceeds the sedimentation rate. The features of bioturbation and ichnofabric are also important indicators for the sedimentation rate in a given depositional basin.

(2) Oxygenation The behavioral types and diversity of trace fossil assemblages can give hints for the understanding about oxygenation of the bottom water and interstitial water. *Domichnia*-dominated associations are normally related to the oxic conditions. *Pasichnia*-dominated associations usually occur where bottom water is aerobic or dysaerobic, and the interstitial water is dysaerobic. *Fodinichnia*-dominated associations, whose trace makers feed in the deep part below the sediment surface, reflect the anoxic conditions of interstitial water. With the increasing oxygen content, the diversity of trace fossil assemblages also increases. The oxic environments contain a moderate to high diversity of trace fossils including different behavior types of trace fossils such as *Domichnia*, *Repichnia*, *Cubichnia*, *Fodinichnia* and so on. The dysaerobic environments generally are dominated by *Fodinichnia* in low diversity assemblages.

Tier analysis also gives clue to the understanding about oxygenation of primary sedimentary environments. The morphology of some trace fossils is related to the oxygen content of the environment. *Zoophycos* has only a simple J-shaped tube with only one opening at the sea-floor in a well-oxygenated environment, whereas it often has two openings at the sea-floor in oxygen-depleted deposits (Wetzel and Werner, 1981). With decreasing oxygen content, the burrow diameter, penetration depth, degree of bioturbation and tiering in deep-sea sediments decrease below a specific threshold value ( $<1-2 \text{ ml O}_2/\text{l}$ ) (Wetzel, 1991).

(3) Energy level The biogenic structures can be used as an index to indicate the energy level of depositional environments. Trace makers usually construct vertical burrows or tubes in shallow-water environments under a high energy condition, whereas they build horizontal burrow systems in lower energy conditions. For example, *Thalassinoides* varies in configuration in different depositional environments. At the top of the Lower Carboniferous Hezhou Formation in Chao County, eastern Anhui, China, *Thalassinoides* is mainly composed of vertical burrow systems which were formed in a shallow water environment under high-energy conditions; in contrast, the *Thalassinoides* found in the Upper Cretaceous Zongshan Formation of southern Tibet is characterized by the horizontal burrow system produced in bathyal environments under lower-energy conditions.

(4) Substrates Composition, texture, stability and hardness of the substrates are the major factors controlling benthic organism distribution and behavior types of the fauna. Like salinity and bathymetry, the substrate is also an important criterion by which ichnofa-

cies are distinguished. Some trace fossils can be used to indicate the nature of the substrate in original sedimentary environments. For instance, *Ophiomorpha* is often related to the unstable substrate regardless of water depth, salinity and oxygen conditions and even sediment composition, whereas *Thalassinoides* appears to be related to the stable substrate. At the top of the Lower Carboniferous Hezhou Formation in eastern Anhui, *Thalassinoides* was produced on the firm ground of omission surface but in the same strata of Kongshan, Nanjing, *Planolites* was produced in the soft ground in subtidal environments under lower energy conditions. Ekdale *et al.* (1984) described the tiered ichnocoenoses controlled by substrate in the Upper Cretaceous shelf-sea chalk of North Europe. Five tiers at least could be distinguished from the deposits. The shallow tiers were dominated by *Planolites*. The deeper layers were usually occupied by *Thalassinoides*, *Zoophycos* and *Chondrites* in proper order. *Planolites*-producers were inclined to live in the soft ground or soup ground near the water sediment surface, but the trace makers of *Zoophycos* and *Chondrites* preferred the firmed (compacted and dewatered) substrate at the deep part below the sediment surface.

(5) Salinity Salinity is an important factor controlling the distribution of organisms. The types, abundance and diversity of trace fossils produced by the activities of organisms are also influenced by salinity. As a useful tool, the biogenic structures can be used in analyzing the salinity of original depositional environments. A. Some ichnotaxa can be regarded as salinity indicators, such as *Scoyenia gracilis*, *Ancorichnus coronus* and *Fuersichnus communitis* which only can be found in the non-marine environments. B. The study of ichnocoenoses and ichnofacies provides some information for understanding the salinity of primary environments. The *Scoyenia* ichnofacies erected by Seilacher (1964, 1967) is supposed to represent all non-marine trace fossils, but it should be divided into several trace fossil assemblages reflecting different environments and bathymetric zonations. Bromley and Asgaard (1979) divided the trace fossils in the Triassic Fleming Fjord Formation in East Greenland into Four trace fossil assemblages—the *Fuersichnus* assemblage occurring in a stable and deeper lake environment; the *Arenicolites* assemblage representing a shallow lake environment, the *Scoyenia* assemblage corresponding to a lake-margin environment under a very shallow-water condition subject to the periodic desiccation, and the *Rusophycos* assemblage marking the end of lake condition and the beginning of a dry river environment.

The *Pasilonichnus* ichnocoenose and *Culvolithus* ichnofacies provide some information about the transitional environments between continental and marine facies with rapid changes in salinity. the former is only found in the post-Pleistocene deposits and rocks, while the latter belongs to the *Cruziana* ichnofacies, indicating a special depositional condition characterized by rapid deposition, sandy substrates and lower energy. The typical marine ichnofacies include the *Sholithos*, *Glossifungites*, *Trypanites*, *Cruziana*, *Zoophycos*, *Nereites* and deep-sea ichnofacies, whereas the *Teredolites* ichnofacies may occur in both marine and transitional facies. C. The features, advance and diversity of trace fossils are related to

the salinity of primary depositional environments. Their diversity is usually moderate in freshwater condition, low in brackish condition, high to very high in normal marine condition, and very low in hyperhaline condition. Howard (1975, 1978) studied the estuarine system along the Georgia coast and found that the diversity of clearly preserved burrows increases seaward and the complete bioturbation increases landward.

4. Some problems should be taken into careful consideration when geologists apply the biogenic structures to environmental interpretation

(1) While using trace fossils to interpret the bathymetry of sedimentary environments, more attention should be paid to the trace fossil associations than to individual ichnotaxon. Sometimes, the latter has broader environmental implications than the former. For example, the trace fossil *Skolithos* has been found in different environments from fluvial to deep-sea environments, but the *Skolithos* ichnofacies is mainly indicative of nearshore environments. (2) The occurrence of some trace fossils has shifted in geohistorical time; for instance, the trace fossil *Zoophycos* is often found in the shallow-water environments in later Palaeozoic, but in the deep-water environments in Mesozoic and Cenozoic. (3) The alternation of some sedimentary factor or factors such as energy level, salinity, oxygenation, etc. might result in the alternation between opportunistic and equilibrium ichnocoenoses. The alternation between different ichnocoenoses should not be mistaken for the large-scale fluctuations in water depth. (4) While using biogenic structures to interpret sedimentary environments, one should take into consideration some other environmental indicators such as non-biogenic structures, carbonate microfacies, geochemical data etc. The precise environmental conclusions can be drawn only after all factors have comprehensively been considered.

## 图版说明

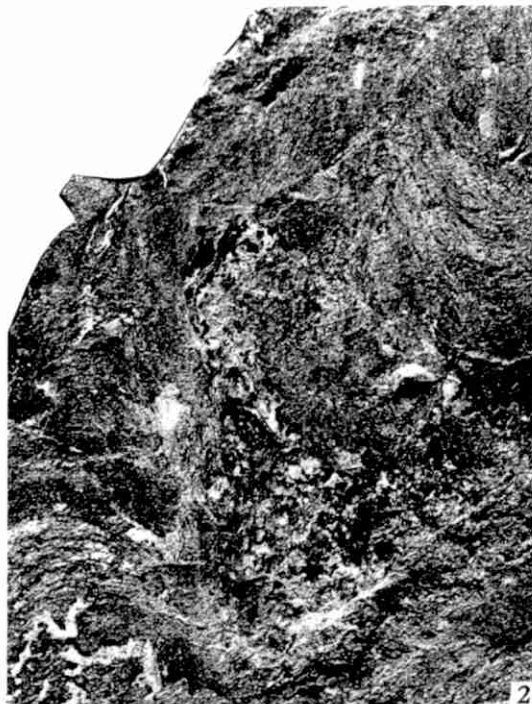
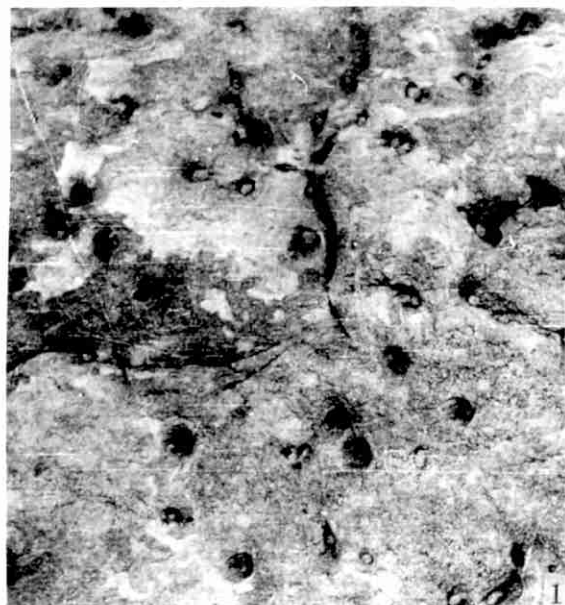
除野外照片外,全部标本保存在中国科学院南京地质古生物研究所。

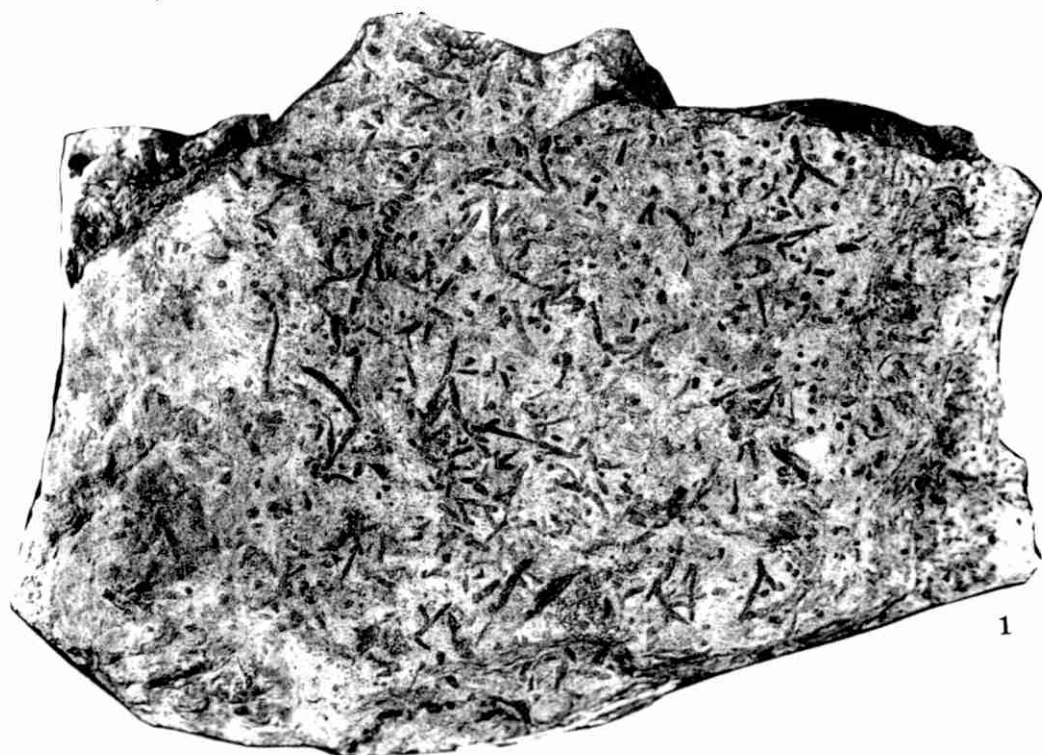
### 图版 I

1. *Arenicolites* sp. 属 *Skolithos* 遗迹相。×0.18, 野外照片。西藏岗巴上白垩统基塔拉组。
2. *Zoophycos* sp. 属 *Zoophycos* 遗迹相。×1。标本号: Du-1。西藏亚东堆拉岗巴群 Upper Albian。
3. ? *Scoyenia* sp. 属 *Scoyenia* 遗迹相。×1。标本号: FKChang。青海可可西里地区长蛇梁, 白垩系。
4. *Ophiomorpha annulata* 产于湖相环境。×1。标本号: FKChang。青海可可西里地区长蛇梁, 白垩系。
5. *Thalassinoides* sp. 产于潮间带潮坪环境。×0.11, 野外照片。安徽巢县凤凰山下石炭统和州组上段。
6. *Teichichnus* sp. 属逃逸迹。×1。标本号: Ar-13。西藏岗巴岗巴群, Middle-Uper Albian。

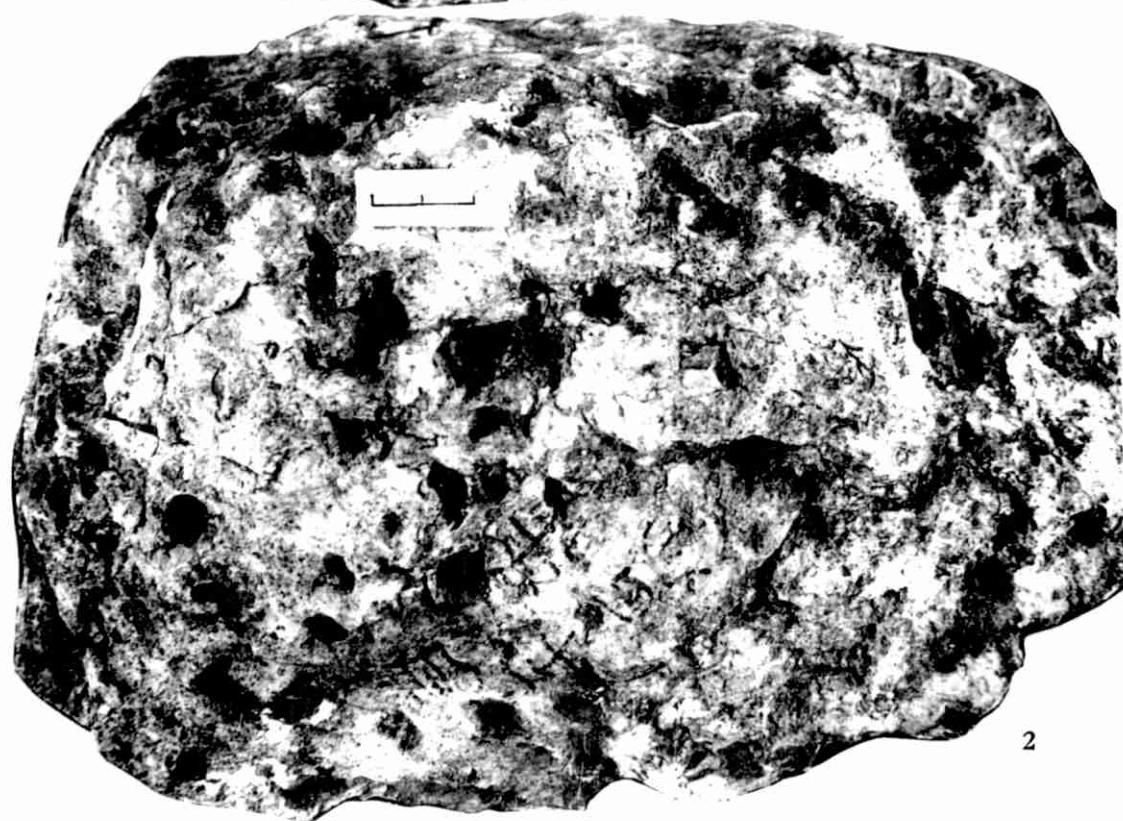
### 图版 II

1. *Chondrites* sp. ×0.67。标本号 Du-2。西藏亚东堆拉岗巴群, Upper Albian。
2. *Planolites* sp. ×0.67。标本号: CH4。南京孔山下石炭统和州组顶部。





1



2