

文章编号: 1000-0550(2003)01-0075-06

# 古代深海底质氧控的遗迹化石群落

晋慧娟 李育慈 方国庆

(中国科学院兰州地质研究所 兰州 730000)

**摘要** 通过中国 9 个深海沉积区近 20 条研究剖面的沉积地质学和古遗迹学的研究,获得了判别深海底质遗迹化石群落与含氧量关系的几点认识:① 深海贫氧的底质中因相对含氧量的差异,其代表性的遗迹化石组合也不尽相同。以 *Megagraption*, *Paleodictyon* 和 *Protopaleodictyon* 为代表的 A 组合,以 *Scalarituba* 和 *Phycosiphon* 为代表的 B 组合,和以 *Chondrites* 和 *Zoophycos* 为代表的 C 组合,所指示贫氧底质中的溶解氧含量,是随组合的不同而依次降低;② 遗迹化石潜穴的粗细通常与底质含氧量呈正相关,即潜穴直径随含氧量降低而变细;③ 遗迹化石的分异度随底质含氧量降低而变低;④ 应用个别遗迹化石属判识贫氧环境要慎重,如 *Chondrites* 或者 *Zoophycos*, 不能不加分析地视为贫氧环境的遗迹化石标志,应结合多种因素综合分析后,才能得出更符合客观实际的认识。

**关键词** 遗迹化石群落 氧控 古代深海底质

**第一作者简介** 晋慧娟 女 1933 年出生 研究员 沉积学

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

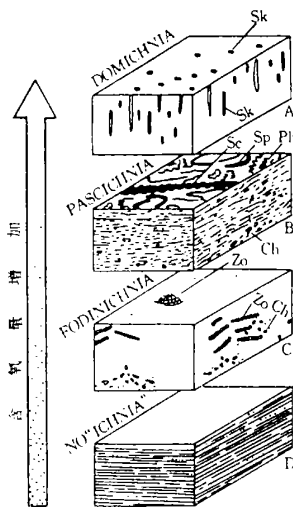
## 1 引言

古代深海底质含氧状况的恢复,对了解某一地质历史时期的古海洋性质、沉积历史演化、底质中有机质的保存状况以及古气候条件都具有十分重要的意义。

深海底质的含氧状况往往与水深、水动力条件、海盆的闭塞和开阔程度以及沉积底质中有机质的含量等多种因素有关,因而其研究难度较大。长期以来,一直缺少有效的研究方法和手段。虽然 Rhoads 等<sup>[1]</sup>曾提出过与氧有关的 3 种生物相模式,即无生物扰动组构的地层为缺氧相;具强烈生物扰动组构的为富氧相;介于两者之间的地层为含氧相,但是针对含氧相的具体含氧程度却显得无能为力。

20 世纪 80 年代,人们开始注意利用遗迹化石群落对底质含氧状况进行判识。这是因为遗迹化石在恢复地层的含氧量及其它生态环境时,具有与实体化石无可比拟的优点:1) 遗迹化石具有“异物同迹”的功能,它在相似的生态环境(包括相似的底质溶氧量)中,即便不是同一种造迹生物,都可形成非常相似的遗迹;2) 遗迹化石为原地形成,形成后不再被搬运,因而更能正确的反映古生态环境;3) 不受时代的限制,同一种遗迹化石分布的时限可以很长。由于遗迹化石所具有的特殊功能,才得以以为利用遗迹化石进行含氧量的对比研究提供有利条件。

Savrdad 等<sup>[2,3]</sup>利用遗迹化石的研究,再现了古水体底部的含氧状态;最引人注意的还是 Ekdale 等<sup>[4]</sup>总结的海洋环境中遗迹化石共生与含氧量之间变化的总模式(图 1)。该模式首次利用遗迹化石群落为判断海底底层水和沉积物粒间水中的含氧量提供了依据。



Sk= *Skolithos*, Sc= *Scalarituba*, Sp= *Spirophyton*,  
Ph= *Phycosiphon*, Ch= *Chondrites*, Zo= *Zoophycos*

图 1 氧控遗迹化石组合的一般模式 (Ekdale 等, 1988)

Fig. 1 General model of Oxygen-dependent trace-fossil as associations (Ekdale et al., 1988)

A 组合:以居住迹为主,底层水和孔隙水均为富氧环境,以产 *Skoliteus* 和 *Cylindricum* 为特征;

B 组合:底层水为富氧或贫氧,孔隙水为贫氧环境,遗迹化石组合是以觅食迹为主,常见遗迹化石有 *Scalarituba*, *Spirophyton* 和 *Phycosiphon* 等;

C 组合:底层水为富氧或贫氧,孔隙水为缺氧环境,以进食迹为主的造迹生物形成的遗迹为特征,以 *Chondrites* 和 *Zoophycos* 为代表,造迹生物的掘穴系统与底层水界石保持着连通,依靠海水中的氧而生活,对孔隙水的缺氧条件具较强的忍耐力;

D 组合:底层水和孔隙水均为缺氧环境,无生物遗迹,主要为纹层状沉积物

近十余年来,笔者围绕以中国西部为主的加里东、海西和印支造山带的九个深海沉积区近 20 条研究剖面进行过沉积地质学和古遗迹学的野外考察和室内研究,对遗迹化石属的分类、丰度、分异度、形体特征及遗迹化石属的共生特点给予了特别关注。本文旨在通过这些深海沉积区遗迹化石群落的对比研究,提出一些与地层含氧状况有关的某些规律性认识

## 2 遗迹化石宿主岩系概况

本文涉及的深海沉积区有:浙江西部临安—建德,内蒙古桌子山,甘肃境内的礼县—天水、夏河—合作、迭部和卓尼,以及新疆准噶尔盆地西北缘哈拉阿拉特山的乌和公路、西缘托里的扎依尔山和南缘乌苏的北天山独库公路等地区。涉及的地层时代有奥陶纪、泥盆纪、石炭纪、二叠纪和三叠纪。对上述各地区相关地层的沉积地质学和遗迹化石研究已分别有论文公开发表<sup>[5-12]</sup>。概括地说,上述已研究的地区均为巨厚的浊积岩系,仅在准噶尔盆地西和西北缘的扎依尔山下石炭统包古图组下部和哈拉阿拉特山中石炭统下部才见有远洋沉积

宏观观察,上述研究地区的浊积岩系和远洋沉积的地层颜色均呈暗色调。岩石的颜色虽是一种直观的,但却又是一项很有用的标志,因为岩石的颜色往往是与底质的含氧量密切相关。各研究区遗迹化石宿主岩系虽均为暗色调,但它们在地区上的色调却甚有差异,并显示出一定的地域性特征。同时,笔者发现遗迹化石的组成与宿主岩石的颜色(即底质含氧状况)之间具有鲜明的选择性。为了查明遗迹化石组合与宿主岩系颜色间的联系,可以根据岩层色调的深浅大致划为两级

I 级 灰—暗灰色、暗绿灰色和暗褐灰色

II 级 黑灰色、黑色

现将各研究区遗迹化石宿主岩系的色调对比列于

表 1 属同一色调的宿主岩系,是按色调的深浅依次予以排列。然而,这种色调深浅的排列只能是定性的,并且它们在垂向上的深浅程度也会有变化,这是由于在漫长的沉积作用过程中,环境参数不可能是一成不变的

表 1 遗迹化石宿主岩系颜色分级表

Table 1 Color grading of ichnofossil host rock series

岩石颜色分级	地区	地区代号及时代	宿主岩系特征
I 级	内蒙古桌子山	1区, O <sub>2</sub>	近源浊积岩系
	浙江临安、建德	2区, O <sub>3</sub>	近源浊积岩系
	甘肃天水—礼县	3区, D <sub>2</sub>	近源浊积岩系
	甘肃卓尼	4区, T <sub>2</sub>	近源浊积岩系
	甘肃夏河—合作	5区, P <sub>2</sub>	近源浊积岩系
	甘肃迭部腊子口	6区, T <sub>1</sub>	近源浊积岩系
II 级	北天山独库公路剖面下段	7区, C <sub>2</sub>	远源浊积岩
	乌和公路剖面中层段上部	8区, C <sub>2</sub>	深海泥岩
	扎依尔山包古图组中部	9区, C <sub>1</sub>	远源浊积岩系
	扎依尔山包古图组下部	10区, C <sub>1</sub>	生物扰动的远洋沉积
	乌和公路剖面下层段	11区, C <sub>2</sub>	生物扰动的远洋沉积

从表 1 看出,准噶尔盆地西北缘、西缘和南缘晚古生代火山碎屑岩系较其它地区遗迹化石宿主岩系的色调要深的多。决定宿主岩系颜色的差异,最主要的是取决于海盆的性质及其相关的环境参数。属 I 级色调的宿主岩系多形成于较开阔的半深海盆地;属 II 级色调的宿主岩系,有些是形成于深海盆地,有些则是远洋盆地。显然,后者的水体深度大,特别是水体的循环状况和底质含氧量都不及前者。

## 3 深海底质氧控遗迹化石群落的判别标志

通过诸多深海沉积区遗迹化石的研究发现,遗迹化石的组合、丰度、分异度和遗迹化石潜穴的粗细都有很大差别。研究表明,它们与宿主岩系的色调之间存在着一定的内在联系。

### 3.1 不同色调宿主岩系遗迹化石群落的对比

为了进一步查明遗迹组合与深海底质含氧状况的关系,现将相关的实际资料列于表 2 中。需要说明的是,在同级色调的宿主岩系中,是选择了各研究区普遍存在的遗迹化石,作为代表性的遗迹化石为基础进行对比研究的,那些仅在部分区内所发现的遗迹化石未列入表 2 内。同时,还应指出,在 I 级色调六个地区的宿主岩系中,遗迹化石的分异度普遍较高,除表中所列的 *Megagraption*, *Paleodictyon* 和 *Protopaleodictyon* 外, *Cosmorhapha*, *Helminthoidea*, *Helminthopsis* 等典型的深水型遗迹分子也是十分常见的。

从表 2 清楚地看出以下几个显著特征:

表 2 代表性遗迹化石组合与岩石色调的关系

Table 2 Relationship between the representative ichnofossil association and rock color

地区代号	时代	岩石色调	代表性的遗迹化石群落
1区	O <sub>2</sub>	I 级	<i>Megagraption</i> , <i>Paleodictyon</i> , <i>Protopaleodictyon</i>
2区	O <sub>3</sub>		<i>Megagraption</i> , <i>Paleodictyon</i> , <i>Protopaleodictyon</i>
3区	D <sub>2</sub>		<i>Megagraption</i> , <i>Paleodictyon</i> , <i>Protopaleodictyon</i>
4区	T <sub>2</sub>		<i>Megagraption</i> , <i>Paleodictyon</i> , <i>Protopaleodictyon</i>
5区	P <sub>2</sub>		<i>Megagraption</i> , <i>Paleodictyon</i> (不完整)
6区	T <sub>1</sub>		<i>Paleodictyon</i> , <i>Protopaleodictyon</i>
7区	C <sub>2</sub>	II 级	<i>Scalartuba</i> , <i>Phycosiphon</i>
8区	C <sub>2</sub>		<i>Scalartuba</i> , <i>Phycosiphon</i>
9区	C <sub>1</sub>		<i>Scalartuba</i>
10区	C <sub>1</sub>		<i>Zoophycos</i> , <i>chondrites</i> , <i>Planolites</i>
11区	C <sub>2</sub>		<i>Zoophycos</i> , <i>Chondrites</i>

① 灰色调与黑色调两种颜色不同宿主岩系中的代表性遗迹化石是截然不同的,而且两者之间具明显的排它性,至今尚未发现两级不同色调宿主岩系的代表性遗迹化石有混生的现象

② 灰色调(含氧量相对较高)的 6个深海沉积区内,除表 2中所列出的 3个代表性的遗迹化石外,实际上不同属的深水型和穿相型遗迹化石都不同程度地出现在该宿主岩系内。从 *Megagraption* *Paleodictyon* 和 *Protopaleodictyon* 在所有黑色调宿主岩系中完全绝迹的现象也充分说明,以这 3种遗迹化石为代表的多种深水型遗迹分子是生活在底质虽然贫氧,但却含有一定溶解氧的环境。Wetzel在研究菲律宾 Sulu 深海沉积中的遗迹化石时,也证明 *Protopaleodictyon* 是形成于与上述相似的环境之中。

③ 黑色调的宿主岩系代表典型的贫氧环境。表 2中所列出的 5个贫氧的沉积层段,还可进一步划分为两种亚环境: 7- 9区代表黑灰色调的远源浊积岩和厚层深海泥岩,它们拥有的遗迹化石是 *Scalartuba*, 并且 *Phycosiphon* 也常与其伴生; 10区和 11区是属于远洋环境的典型贫氧沉积区,它与 7- 9区的遗迹化石组合也截然不同,这里绝没有 *Scalartuba* 和 *Phycosiphon* 的出现。

通过上述诸深海沉积区不同色调宿主岩系中遗迹化石组合的对比研究后,将各遗迹化石组合对底质含氧状况的指示作用概括于图 2内。

如果说,Ekdale 等<sup>[4]</sup>所概括的“氧控遗迹组合一般模式”是泛指包括浅海在内的海洋环境,那么,图 2则是以中国古代海相地层为研究对象,针对深海(包括半深海和远洋)贫氧环境,利用遗迹化石组合定性地估计底质含氧量的一个初步概括。尽管它是从中国的实际资料研究得出的,但我们相信,它对其它深海沉积区会有一些的借鉴意义。从某种意义上说,图 2也是对前人“氧控遗迹化石组合一般模式”的一个补充。

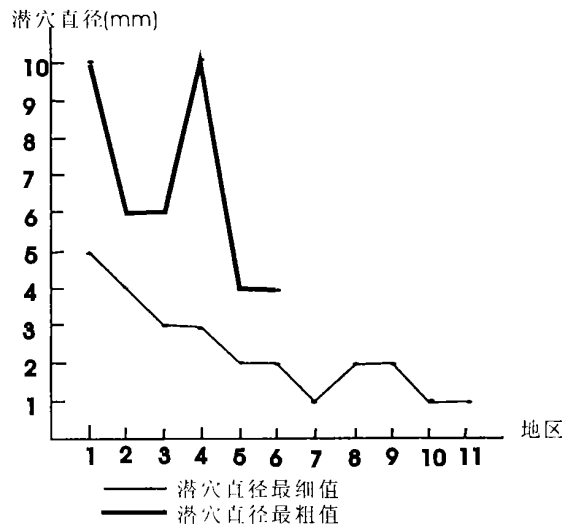


图 2 代表性遗迹化石组合与底质含氧量的关系

Fig. 2 Relationship between the representative ichnofossil association and the oxygen content of substrates

现将图 2 中的 3种遗迹化石组合予以具体说明:

A组合: 指示在贫氧的深海底质中,还含有一定程度的溶解氧,宿主岩系以深灰色调为主。该组合中遗迹化石的形成,都是与浊流突发事件有一定联系。遗迹化石主要分布在浊积岩鲍马序列 Ta段底面和 Te段泥岩的交界面上,并多以 Ta段底面的下凸痕产出。由于浊流的突发,不但使深海底的水动力条件增强,而且也使海水中的溶解氧相应增高,即便 A组合中的遗迹化石都形成于浊流事件后,但是它与基本处于较停滞状态的深海底相比较,其底质中的溶解氧一定会有不同程度的增加。以 *Megagraption*, *Paleodictyon* 和 *Protopaleodictyon* 为代表的 A组合,其遗迹化石是以觅食迹和耕作迹为主,形成它们的造迹生物多是在沉积物表面运动、边取食过程中形成的。

B组合: 指示的底质含氧量较 A组合降低,宿主岩系多为黑色调。该组合中的 *Scalartuba* 和 *Phy-*

*cosiphon*, 主要是产于远源浊积岩和深海泥岩中。从其宿主岩系的形成环境即可看出, 它们是处于较 A 组合更为平静的地区。B 组合中的遗迹化石的分异度较低, 说明该环境已不太适于造迹生物生存。

C 组合: 指示底质含氧量已经很低, 宿主岩系为灰黑和黑色, 代表典型的贫氧环境, 遗迹化石仅在岩层垂直断面上发现挤压在一起的新月形 *Zoophycos* 和 *Chondrites*, 它们属进食迹的遗迹化石。由于这种造迹生物的掘穴系统与海水界面连通, 因而可依靠海水中的氧而生活, 它们是最能忍受贫氧环境的遗迹化石。

Rhoads 等<sup>[1]</sup>最初定义的缺氧带为溶解氧低于 0.1 ml/l, 它是以纹层状的、无生物扰动的沉积组构为特征。其后, Savrda 等<sup>[2]</sup>研究了加里福尼亚盆地保存完好的纹层状沉积物 (即缺氧环境), 其溶解氧在 0.1 ~ 0.2 ml/l 以下, 因此, 他们的研究结果基本相同。而富氧环境的溶解氧浓度通常大于 1.0 ml/l。由此看来, 将贫氧底质中的溶解氧含量确定为 0.1 ~ 1.0 ml/l 是合适的。因此, 图 2 内所示的贫氧程度不同的 3 种遗迹化石组合, 其具体的含氧量应介于此范围之内。

此外, 应该强调指出, 图 2 中表示的两级不同色调宿主岩系中的遗迹化石群落之不同, 是说明深海底质中的造迹生物对低氧浓度的海水所显示出的忍受能力的差异, 因此, A 组合实际是代表了那些与浊流突然事件相关的、分异度较高的、典型的深水型遗迹化石群落;

B 组合和 C 组合中所发现的遗迹化石, 却往往是一些分异度很低的、穿相型遗迹分子组合。基于此, 我们认为, 在深海环境中, 决定遗迹化石的形成和分布, 除水深因素外, 其氧控条件应该比水深因素更显得重要。

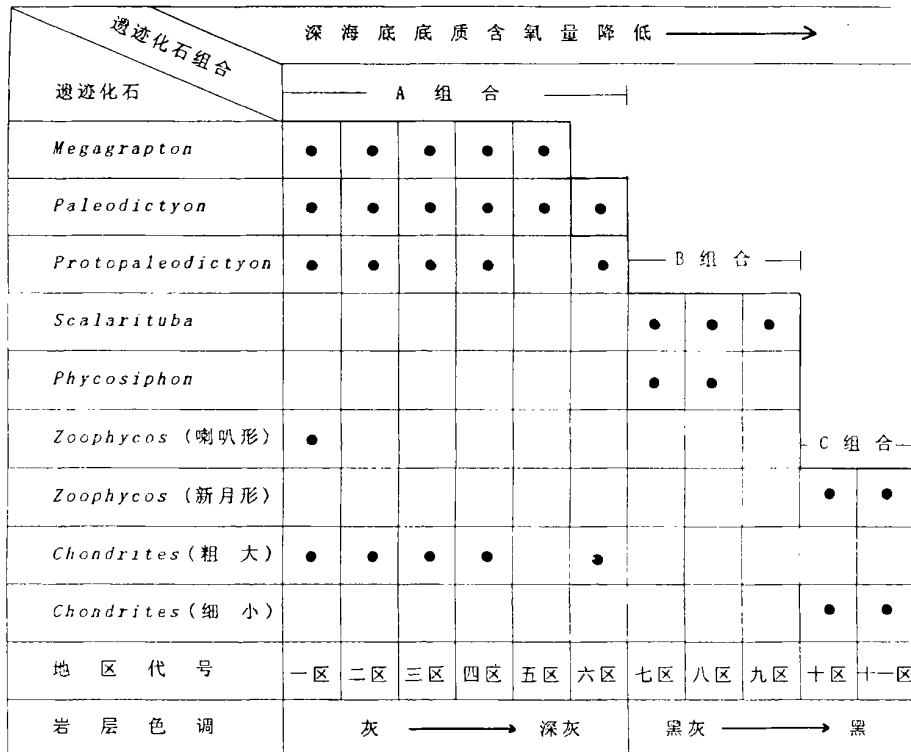
### 3.2 遗迹化石潜穴直径与底质含氧量

对遗迹化石进行野外调查中发现, 宿主岩系呈 I 级色调者明显较 II 级色调的遗迹化石潜穴直径要粗大的多, 特别是岩层色调相对更浅者, 其潜穴直径则更加粗大。内蒙古桌子山中奥陶统拉什仲组的遗迹化石就是最典型的实例, 现将野外对遗迹化石潜穴直径的测量结果, 列于表 3 并以图 3 示之。

表 3 遗迹化石潜穴直径与岩石色调的关系

Table 3 Relationship between the size of ichnofossil burrows and rock color

地区代号	时代	岩石色调	潜穴管粗细 /mm	遗迹属数
1区	O <sub>2</sub>	I 级	5- 10	19
2区	O <sub>3</sub>		4- 6	15
3区	D <sub>2</sub>		3- 6	42
4区	T <sub>2</sub>		3- 10	14
5区	P <sub>2</sub>		2- 4	6
6区	T <sub>1</sub>		2- 4	8
7区	C <sub>2</sub>	II 级	1	2
8区	C <sub>2</sub>		2- 4	3
9区	C <sub>1</sub>		2	1
10区	C <sub>1</sub>		≤ 1	3
11区	C <sub>2</sub>		≤ 1	2



● 表示该遗迹化石的存在

图 3 遗迹化石潜穴直径与岩石色调的关系

Fig. 3 Relationship between the size of ichnofossil burrows and rock color

从表 3 和图 3 明显看出, I 级色调宿主岩系中遗迹化石的潜穴直径, 普遍要粗于 II 级色调宿主岩系中遗迹化石的潜穴, 并且一般要粗大的多。尤其是图 3 更清楚地显示出随着岩石色调加深 (即含氧量降低), 潜穴直径减小的变化趋势十分明显。这一研究结果, 与 Rhoads 等<sup>[1]</sup>提出的随着底部水中溶解氧的减少, 能够在下伏底质中栖息的生物, 其体型也将缩小的认识是基本吻合的。Savrdá 等<sup>[2]</sup>和 Pratt<sup>[13]</sup>的工作也同样证实了这一认识是符合客观实际的, 亦即潜穴管的粗细与含氧量呈正相关性。因此, 无论是根据我们的研究结果, 抑或是依据国外学者的研究资料, 通常都可把遗迹化石潜穴直径的粗细作为判识底质含氧状况的一种标志。

### 3.3 遗迹化石群落的分异度与底质含氧量

深海地层中, 遗迹化石的分异度差别很大。从表 3 中看出, 属 I 级色调的遗迹化石宿主岩系, 其遗迹群落分异度普遍较高或很高, II 级色调宿主岩系遗迹群落分异度与其相比较则逊色得多。导致遗迹群落在这两种不同色调宿主岩系中分异度差别的主要原因, 在于 I 级色调岩层均属浊积岩系, 且以近源浊积岩居多, 而 II 级色调的岩层既有远源浊积岩, 又有深海泥岩或远源沉积。若将它们的底质含氧量进行比较, 显然前者高于后者。含有一定溶解氧的底质, 有利于造迹生物的大量生成的繁衍, 从而导致了多种类型遗迹化石的形成, 因此, 遗迹化石群落的分异度通常与底质含氧量的多少亦呈正相关。应该提及的是, 表 3 中所列每个研究区遗迹化石属的数量并不是绝对值, 它往往与外界因素有一定的联系, 例如露头出露的好坏与所发现的遗迹化石数量就有很大的关系。尽管如此, 这两级不同色调宿主岩系遗迹化石分异度差别之大却是客观存在的事实。

### 3.4 *Chondrites* 和 *Zoophycos* 环境意义的再认识

国内外学者通常将 *Chondrites* 和 *Zoophycos* 作为一种特殊的贫氧环境的遗迹化石标志。笔者通过中国近十个深海沉积区遗迹化石研究发现, 这一认识并不全面。因为, 我们在含一定溶解氧的灰色调宿主岩系中同样也发现 *Chondrites* 或 *Zoophycos* 的存在, 特别是 *Chondrites* 几乎在灰色调 (即含一定溶解氧) 的浊积岩层面上都有发现, 只是它们的潜穴粗大。这种形体粗大的 *Chondrites* (潜穴直径 > 1 mm) 不应视为是贫氧环境的遗迹化石标志。此外, 在内蒙古桌子山中奥陶统拉什仲组的灰色细粉砂质浊积岩层面上还发现了 *Zoophycos*, 它们呈螺旋形展布于层面上, 其展布面积为 11 cm × 14 cm。从该宿主岩系的形成环境、色调及与其相伴生的遗迹化石形体普遍粗大等特征综合分析

来看, 这种形状的 *Zoophycos* 也不应视为是贫氧环境的标志。

在黑色调宿主岩系 (贫氧环境) 发现的 *Chondrites* 和 *Zoophycos*, 无论从产出特征、潜穴的粗细或者从外貌特征来看, 均与上述灰色调岩层中的这两种遗迹化石极不相同。首先, 黑色调宿主岩系中的这两种遗迹化石多产于层内, 并在岩层的垂直断面上经常被发现; 其次, 两者的潜穴都十分纤细, 特别是 *Chondrites* 在岩层的垂直断面上多以不足 1 mm 的小圆点集合体出现。在古代远洋沉积物中的 *Zoophycos* 也都是发现于岩层的垂直断面上, 多与层面斜交或平行, 其外形为紧压排列在一起的新月型, 它与 Ekdale<sup>[14]</sup> 在深海钻井岩心中所发现的 *Zoophycos* 完全相同。通过古代与近代远洋沉积物中 *Zoophycos* 的对比, 可以得出这样一种认识, 即: 在远洋沉积的岩层断面上呈新月形的 *Zoophycos*, 可以将其作为贫氧环境的遗迹化石标志。至于产于岩层面上的外形呈特殊的“公鸡尾巴”外貌 (即喇叭形或螺旋形) 的 *Zoophycos*, 是否也应视为形成于贫氧环境, 还可根据共生的遗迹组合, 以及其它沉积相标志综合研究后才能确定。因为在世界范围内古代浅海的沉积环境中, 已有不少类似于“公鸡尾巴”外貌的 *Zoophycos* 的报道。以中国为例, 在石炭纪和二叠纪海陆交互的煤系地层中就有这种 *Zoophycos* 的广泛发育; 又如在前所述的含氧量相对较高的内蒙古桌子山奥陶系拉什仲组浊积岩系中也有它的发现。通过上述研究说明, *Chondrites* 和 *Zoophycos* 不能不加具体分析地认为是在贫氧或缺氧环境中形成的, 还应该结合多种因素进行综合研究后, 才会得出更符合客观实际的认识。

### 参考文献 (References)

- 1 Rhoads D C, Morse J W. Evolutionary and ecologic significance of oxygen-deficient marine basins [J]. *Lethaia*, 1971, 4: 413-428
- 2 Savrdá C E, Bottger D J, Gorsline D S. Development of a comprehensive oxygen-deficient marine biofacies model [J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68: 1179-1192
- 3 Savrdá C E, Bottger D J. Trace-fossil model for reconstruction of paleo-oxygenation in bottom waters [J]. *Geology*, 1986, 14: 3-6
- 4 Ekdale A A, Mason T R. Characteristic trace-fossil associations in oxygen-poor sedimentary environments [J]. *Geology*, 1988, 16: 720-723
- 5 晋慧娟, 李育慈. 浙西上奥陶统于潜组 *Spirodesmos* 遗迹化石组合的环境意义 [J]. *地质科学*, 1998a, 33(3): 282-289 [Jin Huijuan, Li Yuci. Environmental significance of a *Spirodesmos* ichnofossil assemblage from Upper Ordovician formation in the western Zhejiang Province [J]. *China Science Geologica Sinica*, 1998a, 33(3): 282-289]
- 6 晋慧娟, 李育慈. 准噶尔盆地西北缘石炭纪生物成因的沉积构造

- 研究 [J]. 科学通报, 1998b, 43(17): 1888~ 1891 [Jin Huijuan, Li Yuci. Carboniferous biogenic sedimentary structures on the north-western margin of Junggar Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(4): 368~ 372]
- 7 晋慧娟, 李育慈. 西秦岭北带泥盆系舒家坝组深海陆源碎屑沉积序列的研究 [J]. 沉积学报, 1996, 15(1): 1~ 10 [Jin Huijuan, Li Yuci. Study on the sequence of abyssal terrigenous clastic deposit of Shujiaaba Formation (Devonian) in Northern belt of Qinling Mountains [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(1): 1~ 10]
- 8 晋慧娟, 李育慈. 西准噶尔扎依尔山下石炭统火山碎屑复理石相的研究 [J]. 沉积学报, 1989a, 7(增刊): 63~ 78 [Jin Huijuan, Li Yuci. Study of the Flysch facies of volcanic bubble of Lower Carboniferous of the Zhayier mountain in the west of Junggar [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7( Supp). 63~ 78]
- 9 晋慧娟, 李育慈. 新疆北天山中石炭统的复理石相 [J]. 沉积学报, 1989b, 7(1): 49~ 57 [Jin Huijuan, Li Yuci, Li Juying. The Flysch facies of Middle Carboniferous in the northern Tianshan, Xinjiang [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(1): 49~ 57]
- 10 晋慧娟, 李育慈. 西秦岭早三叠世深水碳酸盐岩沉积演化模式 [J]. 中国科学 (B 辑), 1994, 24(8): 890~ 896 [Jin Huijuan, Li Yuci. Sedimentary evolution models of Lower Triassic deep-water carbonate rocks of west Qinling Mts [J]. Science in China, 1995, 38(6): 758~ 768]
- 11 晋慧娟, 李育慈. 西秦岭二叠纪—三叠纪遗迹化石及其环境意义. 地质科学, 1995, 30(4): 321~ 328 [Jin Huijuan, Li Yuci. Trace fossils and their environmental significance of Permian-Triassic, western Qinling Mountains [J]. Scientia Geologica Sinica, 1995, 30(4): 321~ 328]
- 12 晋慧娟, 李育慈. 西秦岭造山带中三叠统复理石相研究 [J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 321~ 326 [Jin Huijuan, Li Yuci. A study on Middle Triassic Flysch facies in west Qinling Orogenic belt [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 321~ 326]
- 13 Pratt L M. Influence of paleoenvironmental factors on preservation of organic matter in Middle Cretaceous Greenhorn Formation, Pueblo, Colorado [J]. AAPG Bulletin, 1984, 68 1146~ 1159
- 14 Ekdale A A. Abyssal trace fossils in worldwide deep sea drilling project cores [A]. In Crimes T P, Harper J C, eds. Trace fossils II [C]. Liverpool: Seel House Press, 1977. 163~ 182

## Oxygen-dependent Ichnocoenose in Paleo-pelagic Substrates

JIN Hui-juan LI Yu-ci FANG Guo-qing

(Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract** On the basis of sedimentological and palichnological investigations on the nearly 20 profiles of 9 paleo-pelagic depositional areas in China, some conclusions on the identification of the relationship between ichnocoenose in paleo-pelagic substrates and the oxygen content have been drawn as follows ① The difference in the relative oxygen content of the pelagic oxygen-depleted substrate produces a different representative ichnofossil association, i. e. the dissolved oxygen content of the oxygen-depleted substrate indicated by Associations A, B and C, which are mainly composed of *Megagraption*, *Palaeodictyon* and *Protopalaeodictyon*, of *Scalarituba* and *Phycosiphon*, and of *Chondrites* and *Zoophycos*, respectively, decreases gradually with different associations; ② The size of ichnofossil burrows usually has a normal relationship with the oxygen content of substrates, namely the diameter of burrows becomes smaller with decreasing of the oxygen content; ③ The differentiation of ichnofossils decreases with decreasing of the oxygen content of substrates; ④ It should be prudent to apply some individual ichnofossils in identifying the oxygen-depleted environment, for instance, *Chondrites* and *Zoophycos* can not be always regarded as an ichnofossil indicator to an oxygen-depleted environment, it is necessary to investigate multiple factors before a conclusion that more accords with the true fact can be drawn.

**Key words** ichnocoenose, oxygen-dependent, paleo-pelagic, substrates