

论文

浙江煤山钻孔二叠-三叠系界线剖面遗迹化石的两幕式变化

赵小明^{①②*}, 童金南^①

① 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074;

② 武汉地质矿产研究所, 武汉 430223

* E-mail: zxm20040021@163.com

收稿日期: 2010-05-13; 接受日期: 2010-08-19

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2006CB80640)和国家自然科学基金(批准号: 40830212, 40772022)资助

摘要 通过对浙江长兴煤山二叠-三叠系界线全球层型剖面附近钻孔岩芯的研究, 识别出遗迹化石 *Chondrites*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Rhizocorallium*, *Skolithos*, *Thalassinoides* 共 6 属, 遗迹化石的丰度、扰动指数及扰动深度等遗迹学指标在二叠-三叠系界线上下呈现两幕式剧烈变化: 第一幕发生在 25~27b, 在此区间, 生态习性相对复杂的 *Chondrites*, *Skolithos*, *Rhizocorallium* 和 *Thalassinoides* 遗迹化石从此逐步消失, 扰动指数从 1~5 级降低至 1~3 级, 扰动深度从 5~66 cm 降低至 2~5 cm; 第二幕发生在 32 层与 33 层之间, *Palaeophycus* 和 *Planolites* 遗迹消失, 33 层至 41 层下部未见任何遗迹和扰动现象, 41 层中上部遗迹再次出现, 但仅见简单细小的 *Planolites*, 扰动指数再未超过 3 级, 扰动深度小于 4 mm. 第一幕变化较为剧烈, 对应于二叠纪末生物灭绝主幕; 第二幕相对较弱, 对应于造迹生物在早三叠世初的灭绝尾幕; 随后出现的遗迹以生态习性和结构简单的表生潜穴占绝对优势, 这表明经历了二叠纪末大灭绝沉重打击后, 早三叠世初残存期的底栖生态系由表生固着向表生游移转折. 也就是说, 二叠-三叠纪之交遗迹化石的演变与实体化石的演变有着相似的幕式变化过程与趋势. 另外, 二叠-三叠纪之交遗迹组构的变化与碳同位素负偏、蓝细菌泛滥之间也存在良好的对应关系. 作为物理过程与生物过程相互作用的产物, 遗迹化石在研究二叠-三叠纪之交的生物和环境事件及其耦合关系和演变规律方面, 提供了独特的材料, 具有重要的启示意义.

关键词

遗迹化石
扰动指数
扰动深度
二叠-三叠系界线
两幕式演化
煤山钻孔

浙江长兴煤山二叠-三叠系剖面作为我国华南海相沉积的代表性剖面之一, 是世界上唯一拥有两个“金钉子”的地点, 即国际地科联于 2001 年 3 月最终确认的二叠系与三叠系界线全球层型剖面 and 点 (GSSP)^[1]及 2005 年 9 月确认的长兴阶底界的 GSSP^[2].

该剖面在古生物学、地层学、沉积学、古地磁学、同位素地质学、分子生物学及二叠纪末生物灭绝事件证据和机制的研究等方面积累了丰富的地质资料, 获得了引人注目的成果^[1,3~17], 但该层型剖面遗迹学的研究尚未引起足够的重视.

引用格式: Zhao X M, Tong J N. Two episodic changes of trace fossils through the Permian-Triassic transition in the Meishan cores, Zhejiang Province. *Sci China Earth Sci*, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4093-x

2001年,笔者所在的团队在距煤山GSSP剖面不足500m的范围内(图1),布设钻孔8个,控制包括二叠-三叠系界线在内的上二叠统-下三叠统地层.本文选择岩芯采取率较高、具代表性的1号钻孔(ZK-1)和8号钻孔(ZK-8)进行详细的遗迹学研究,在鉴别遗迹类别和统计扰动程度、垂向扰动深度的纵向变化基础上,利用遗迹化石为物理过程与生物过程相互作用的产物这一特有属性,建立二叠纪末灭绝事件前后遗迹化石演变与底栖生物演变间的对应关系,探讨生物事件和环境事件及其耦合关系.

1 岩芯岩性及遗迹化石特征

1.1 1号钻孔(ZK-1)

ZK-1岩芯长25.2m,控制地层厚17.2m,相当于煤山D剖面的24~62层(本文分层同Zhang等^[18]的划分方案).对应于岩石地层单位的长兴组顶部、殷坑组、和龙山组下部,主体岩性为灰-灰绿色薄中层状钙质泥岩、炭质泥岩、泥灰岩,灰色薄中层状微晶灰岩、薄层状泥晶灰岩,为宽缓斜坡-盆地相沉积^[19,20].从岩性的垂向分布来看,下部以灰黑色-灰绿色泥岩、炭质泥岩、钙质泥岩占优势,体现出慢速沉积特征;向上灰岩层增多增厚,泥岩迅速减少,沉积速率加快,体现出海退过程中的进积型充填序列特征^[19].

该钻孔岩芯中能观察到的遗迹化石丰度、分异度均较低,仅鉴定出遗迹化石3属:*Thalassinoides*, *Planolites*和*Palaeophycus*.分布于27, 30, 31, 41~43, 45, 51~56, 59~61层中,多顺层孤立出现,原始层理

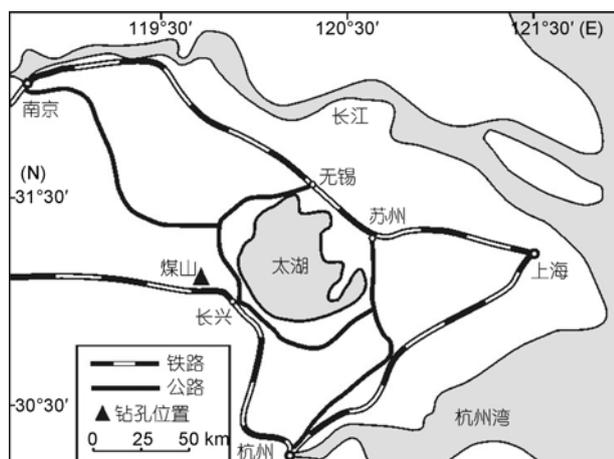


图1 煤山钻孔剖面地理位置图

可见.另据曹长群等^[13]资料,在煤山剖面26层中产*Chondrites*, *Planolites*及*Zoophycos*.

*Palaeophycus*为平行或低角度斜交层面的柱状潜穴,光滑不分枝,具薄的衬壁,断面上呈椭圆-圆形,直径0.8~2mm,潜穴充填物与寄主地层相同(图2(a), (b)),被认为是由捕食性生物或滤食性生物形成的开放式居住潜穴^[21]或食沉积物生物形成的潜穴^[22].

*Planolites*为平行或低角度斜交层面的柱状或亚柱状潜穴,光滑不分枝,断面上呈圆-椭圆形,直径0.5~2mm,潜穴充填物与寄主地层差异明显(图2(d)),被认为系食沉积物软体或蠕虫状动物的觅食构造^[21~24].

*Thalassinoides*仅见于27b层,为三度空间分枝的潜穴系统,垂直潜管不清楚,横切面上呈不规则分布的圆形或扁圆形,直径1.2~5.5mm,潜穴充填物与寄主地层不同(图2(c)),被认为系固结但非石化的底层上形成的居住兼觅食潜穴^[22,25,26].

*Rhizocorallium*与*Thalassinoides*同时见于27b,为顺层分布的“U”型潜穴,两翼管基本上近于平行,断面上呈对称出现,蹼状构造不清楚,潜穴直径1.2~3mm,潜穴充填物与寄主地层不同(图2(c)),曹长群等^[13]称之为*Glossifungites*遗迹,被认为系食沉积物动物的觅食构造^[22].

根据Droser和Bottjer^[27]及Taylor和Goldring^[28]的划分方法,对其扰动程度进行了统计,扰动指数1~3,以1和2为主,总体扰动程度较低.遗迹以水平潜穴占绝对优势,垂向扰动能力低,扰动深度小于4mm(图3).

1.2 8号钻孔(ZK-8)

ZK-8岩芯长15.88m,控制地层厚11.23m,相当于煤山D剖面的16~30层(本文分层同Zhang等^[18]的划分方案).主要岩性为灰-深灰色中厚层状含硅质条带生屑灰岩、含生物屑砂屑微晶灰岩、亮晶生物屑砂屑灰岩及硅泥质微晶灰岩,为碳酸盐台地沉积^[19].

岩芯中观察到的遗迹化石丰度、分异度较高,可鉴定出的遗迹属主要有:*Chondrites*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Skolithos*和*Thalassinoides*等(图4).

*Chondrites*为平行层面或倾斜的树枝状潜穴系统,见1~2级分支,分枝角度30°左右,潜穴直径0.5~2.5mm,在同一潜穴系统中,各分枝不相互穿越,分枝角度和分枝潜穴直径基本不变.潜穴充填为被

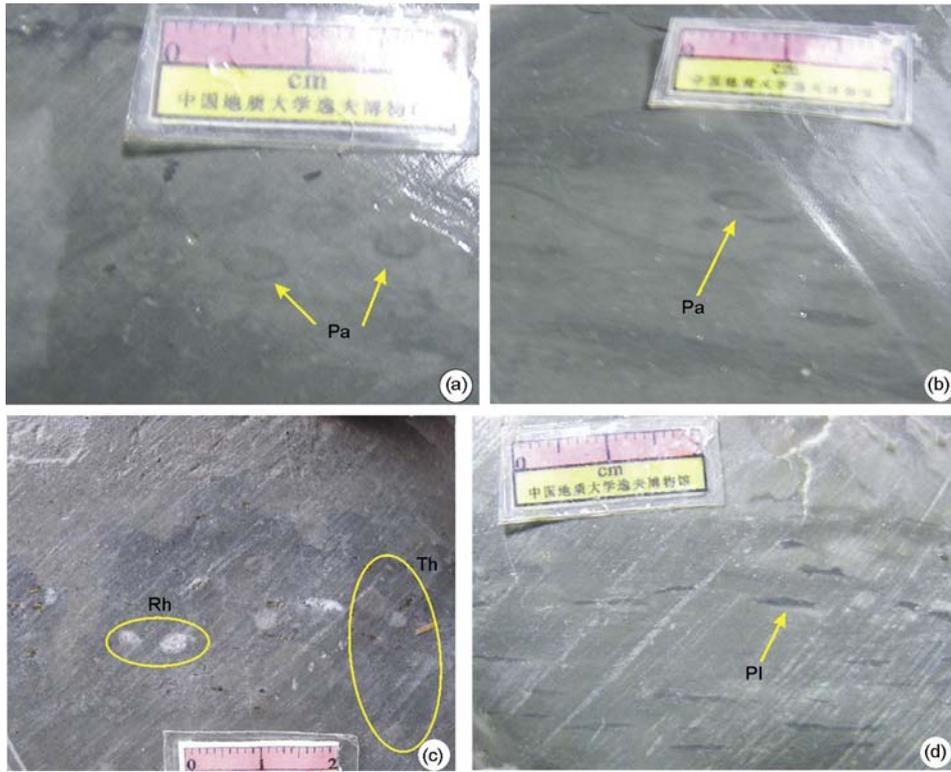


图 2 钻孔 ZK-1 岩芯中遗迹化石宏观特征

Pa, *Palaeophycus*; Pl, *Planolites*; Rh, *Rhizocorallium*; Th, *Thalassinoides*. (a) 第 30 层钙质泥岩中 *Palaeophycus*; (b) 第 52 层含炭钙质泥岩中 *Palaeophycus*; (c) 第 27b 层泥灰岩中 *Rhizocorallium* 与 *Thalassinoides*; (d) 第 52 层泥灰岩中 *Planolites*

动充填, 充填物成分、颜色和结构等方面与寄主层不同(图 4(b), (d), (f), (g)). *Chondrites* 通常被认为是蠕虫状动物的食泥潜穴^[22,29,30].

Planolites 为平行或低角度斜交层面的柱状或亚柱状潜穴, 无衬里, 光滑不分枝, 潜穴断面呈椭圆-圆形, 直径 0.5~3 mm, 潜穴充填物与寄主地层差异明显(图 4(b), (f)). *Planolites* 与 *Chondrites* 的分枝潜穴在岩芯断面上的特征较为相近, 但从组合特征来看, *Planolite* 以平行层面的点线状、断续短柱状及层状为主, 而 *Chondrites* 以分枝状和簇状点形式出现.

Palaeophycus 为柱状或亚柱状潜穴, 平行或斜交层面, 光滑不分枝, 具薄的衬壁, 潜穴充填物与寄主地层相同, 断面呈圆形-短柱状, 潜穴直径 0.8~5 mm. 与 ZK-1 中的 *Palaeophycus* 相比有两点差别: 一是与层面的交角变化较大; 二是潜穴直径较粗(图 4(a)).

Thalassinoides 为斜交或垂直层面的弯曲的柱状分枝潜穴系统, 断面上呈不规则的短柱状或 Y 形分枝, 分枝处潜穴直径明显膨胀变粗, 潜穴直径 3~8 mm,

潜穴充填物具有与寄主地层不同的岩性、颜色和结构(图 4(a)~(c)). *Thalassinoides* 通常被认为是甲壳纲的居住兼觅食潜穴系统^[22,25,26].

Skolithos 为垂直层面的柱状潜穴, 不分枝, 具不明显的蹠状构造, 潜穴直径 2~4 mm, 长 15~66 mm, 潜穴充填物与围岩不同(图 4(e)), 可能为造迹生物的居住兼觅食潜穴.

根据 Droser 和 Bottjer^[27] 及 Taylor 和 Goldring^[28] 划分方案, 扰动指数 1~5, 以 3 和 4 为主, 总体扰动程度较高. 遗迹表现为平行层面、斜交层面或垂直层面等多种钻进方式, 垂向扰动能力较强, 扰动深度 5~66 mm(图 3).

2 P/T 界线上下主要遗迹学指标的变化

2.1 遗迹化石分异度的变化

ZK-1 和 ZK-8 两钻孔识别出的遗迹化石共 6 属, 包括觅食迹、牧食迹和居住迹, 属 *Cruziana* 遗迹相^[31].

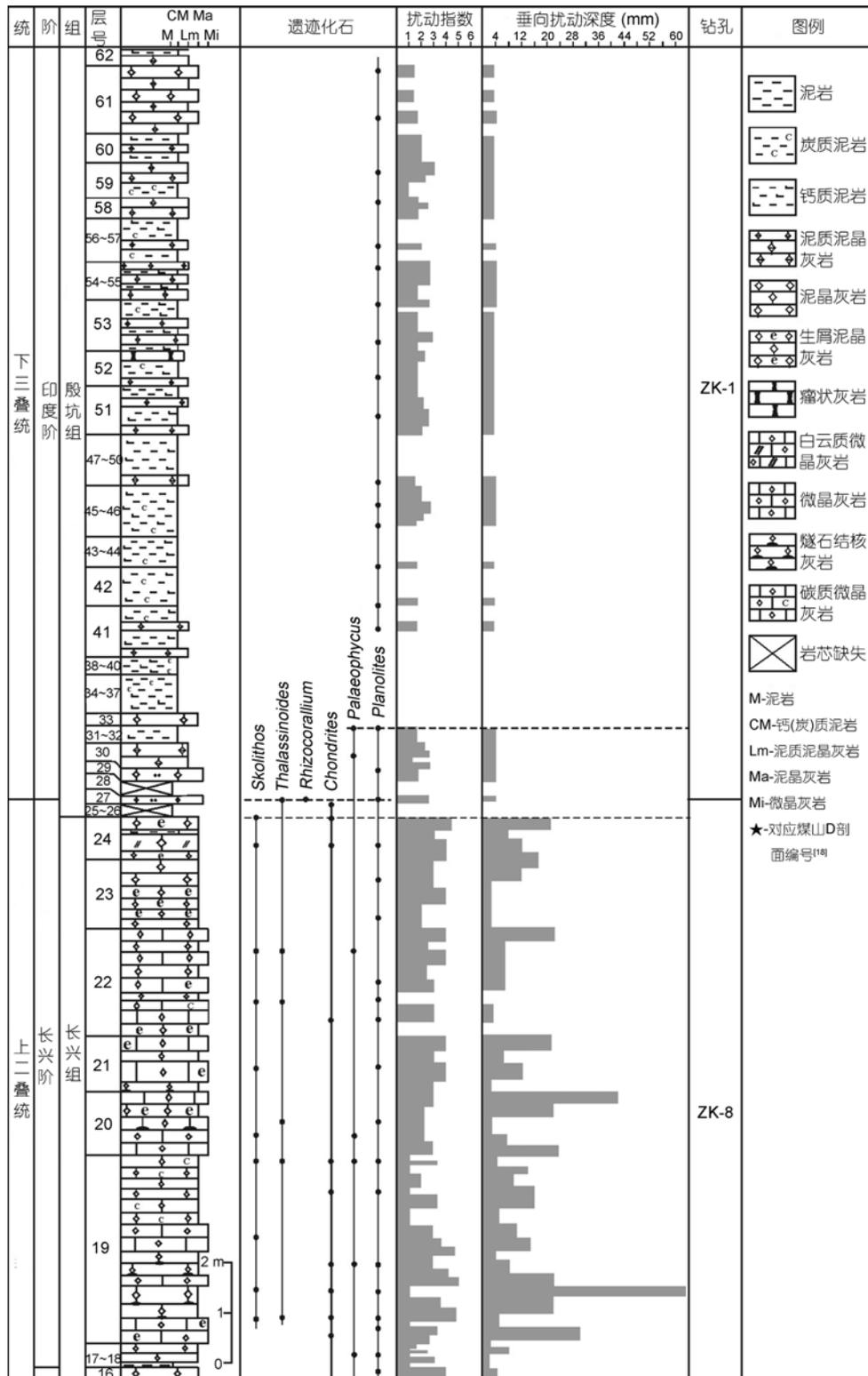


图3 钻孔 ZK-1 和 ZK-8 遗迹学特征垂向分布图

虚线示遗迹学指标两次突变界线, 注意遗迹化石分异度突变界线发生于 27b, 稍高于扰动指数与垂向扰动深度的突变界线 24 层顶

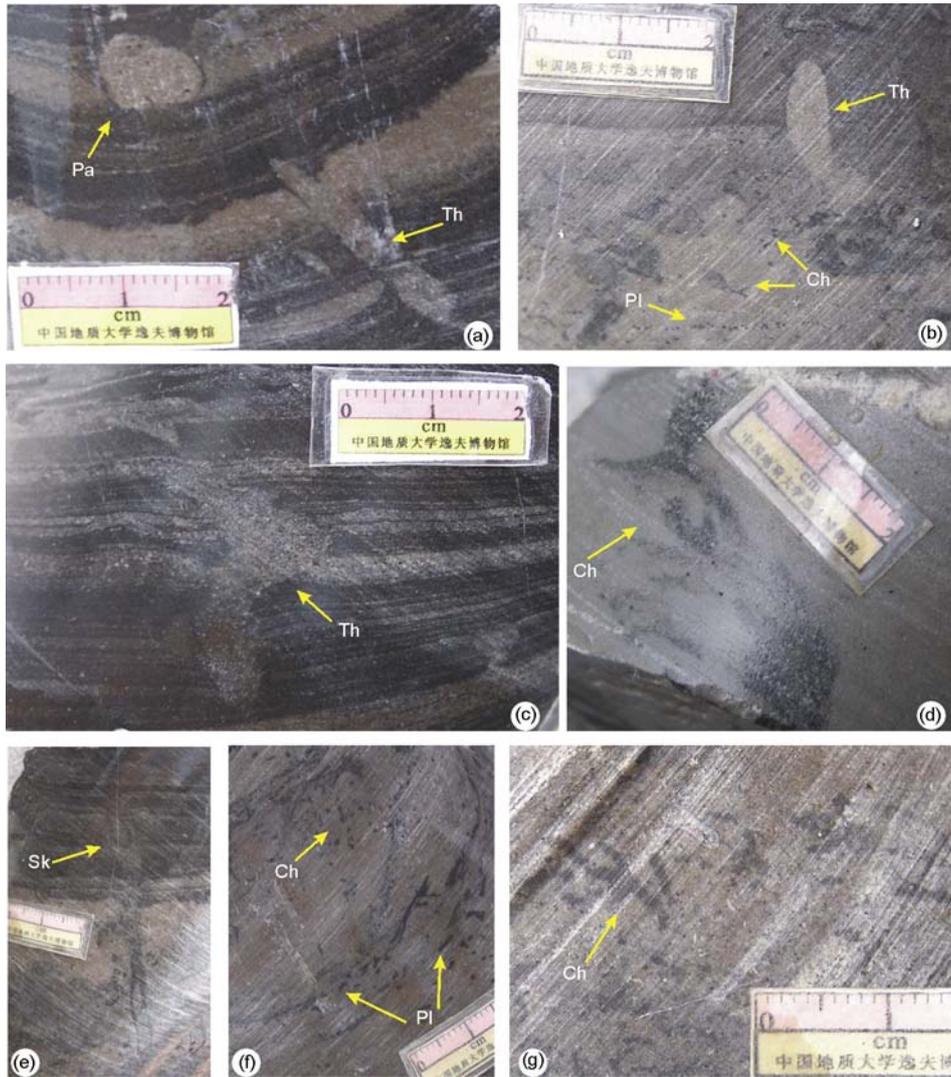


图4 钻孔 ZK-8 岩芯中遗迹化石宏观特征

Ch, *Chondrites*; Sk, *Skolithos*. (a) 第20层下部泥灰岩中 *Palaeophycus* 和 *Thalassinoides*; (b) 第19层上部泥晶灰岩中 *Thalassinoides*, *Planolites* 和 *Chondrites*; (c) 第20层中部泥灰岩中 *Thalassinoides*; (d) 第19层下部泥晶灰岩中 *Chondrites*; (e) 第19层中部泥质条带泥晶灰岩中 *Skolithos*; (f) 第18层泥晶灰岩中 *Planolites* 和 *Chondrites*; (g) 第19层中部泥晶灰岩中 *Chondrites*

其中 *Thalassinoides* 消失于 27b; *Skolithos* 最后出现于 24 层顶部; *Chondrites* 在岩芯中最高层位为 24 层顶, 但据曹长群等^[13]资料, 第 26 层中仍产 *Chondrites*, 因而其应消失于 26 层; *Rhizocorallium* 仅见于 27b; *Palaeophycus* 现于 17~32 层众多层位, 于 32 层底部出现后即告消失; 唯有 *Planolites* 自下而上断断续续贯穿于除 33~40 层之外的各个层位(图 3)。总体看来, 27b 层之前(特别是 24 层之前), 遗迹化石分异度相对较高, 表明造迹生物生态习性复杂多样; 二叠-三叠

系界线之上(27c~32 层)遗迹化石分异度较低; 而 33~41 层下部未见遗迹化石; 41 层中部~61 层遗迹化石分异度极低, 反映出造迹生物类型单调。

值得注意的是, 一般认为古生代 *Chondrites* 遗迹组可发育于充氧-缺氧的多种古氧相环境^[32], 而类似本文所描述的直径细小、低丰度、低分异度、寄主层颜色深的 *Chondrites* 则指示一种贫氧环境^[32-36]。 *Rhizocorallium* 和 *Thalassinoides* 在 27b 层的出现可能指示了一种固底构造。

2.2 遗迹化石丰度的变化

本文采用扰动指数来半定量地指示遗迹化石的丰度,从统计结果看,扰动指数在垂向上的变化大致可分为四段:16~24层扰动指数1~5,以3和4为主,虽有波动,但总体扰动程度较高;27~32层,扰动程度急剧下降,但扰动现象并未完全消失,扰动指数1~2;33~41层下部,扰动完全消失;遗迹于41层中部再现,延续至61层,扰动指数1~3,总体上看,扰动程度有所恢复但仍保持较低水平(图3)。

换言之,遗迹化石丰度在24层/25层和32层/33层之间发生了两次明显变化:24层之后扰动指数急剧下降,扰动指数从1~5级降低至1~3级;32层之后,较长时间内未发现生物扰动现象,即使是41层中部之后扰动现象再次出现,其扰动指数再也没有超过3级。

2.3 垂向扰动深度的变化

16~24层中造迹生物垂向扰动能力较强,扰动深度5~40 mm,以12~22 mm为主,19层中*Skolithos*潜穴最深达66 mm;27~61层中造迹生物以水平潜穴或顺层游移为主,垂向扰动能力低,扰动深度2~5 mm,以2~3 mm为主(图3)。

3 遗迹化石两幕式变化对底栖生态系变化的指示

遗迹化石是生物在特定的环境中运动、觅食、居住等各种生命活动的结果,为生物过程和物理过程相互作用的产物,而且形成之后不再移动位置,代表原地埋藏环境,因而具有指示动物生态习性和生活环境的意义。已有研究表明,海相遗迹化石和遗迹组构取决于底栖生物的分异度、个体大小、生态习性等,而这些主要受水深、盐度、含氧量、水动力条件、基底性质、沉积速率、有机质供给、突发事件等因素的影响^[22]。煤山钻孔研究结果显示,遗迹化石的丰度、分异度(扰动指数)及垂向扰动深度在二叠-三叠纪之交发生了两次明显变化,这与PTB上下的岩性差异无关,而是指示当时海洋底栖生物群落和海洋底层环境(即底栖生态系)亦发生了两次急剧变化:

第一次发生在25~27b区间,遗迹化石分异度和丰度(扰动指数)骤然减少、相对复杂的分枝和结网系统潜穴退出沉积记录、垂向扰动深度(特别是24层顶

之后)急剧下降。分异度和丰度的减少反映出底栖生物种类和数量的急剧减少,这与煤山剖面及相邻的黄芝山剖面实体化石研究得出的结果完全吻合^[3,5,14,37,38],与二叠纪末大灭绝第一幕发生的时间基本一致。另一方面,扰动指数高(即丰度高)表明在该遗迹组发育时段内,环境压力较小且环境长时期稳定,造迹生物有充足的时间对底层进行较强烈的扰动;反之,扰动指数的骤然降低,反应了环境压力的增大,如沉积物内含氧量降低、富含H₂S等有毒物质成分增加等^[39]。遗迹化石复杂程度和垂向扰动深度的变化反映出造迹生物的生活空间从三维向二维转变,标志着底栖生态系由表生固着向表生游移的重大转折。这种生态习性的改变可能源于海洋底层环境的变化,如缺氧程度的增加(沉积物内缺氧严重使得生物无法生存)、初级生产力降低(固定位置上小半径内获取的食物无法满足能量代谢需求)及幸存者稀少而生态竞争骤然下降(无需为躲避天敌而深潜于沉积物之内)等^[40-42]。

第二次发生在32层与33层之间,遗迹化石完全消失。也就是说,随着海洋环境的进一步恶化,躲过第一幕灭绝打击的残存者及残存期的新生分子也遭受灭顶之灾,此时整个底栖生态系呈后生动物缺乏而微生物泛滥之特异面貌^[10]。遗迹化石的此次变化在时间上对应于二叠纪末大灭绝第二幕,不过开始层位(32层顶)较实体化石研究结果(28层顶)稍高。随后,简单细小的*Planolites*自41层中部的再次出现并延续至61层,这与经历了两幕沉重打击后,煤山剖面及其他不同相区下三叠统剖面均显示以高丰度低分异度的软体动物占据主导的生态系面貌一致^[43]。

4 遗迹化石两幕式变化与其他环境标志的对比

二叠-三叠系界线附近的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大幅度负漂已为较多学者所发现, $\delta^{13}\text{C}$ 的演化趋势不但作为全球二叠-三叠系界线地层对比的重要标志,而且对于研究古生代-中生代之交生态环境演化、早三叠世生物复苏也具有极其重要的意义。煤山剖面碳同位素存在两次负漂^[11,15,44]:第一次负漂发生在25~27b层,与遗迹化石的第一幕变化对应;第二次负漂发生在33~37层,与遗迹化石的第二幕变化基本一致(图5)。对于早三叠世碳同位素快速的重大变化很难用目前已提出的

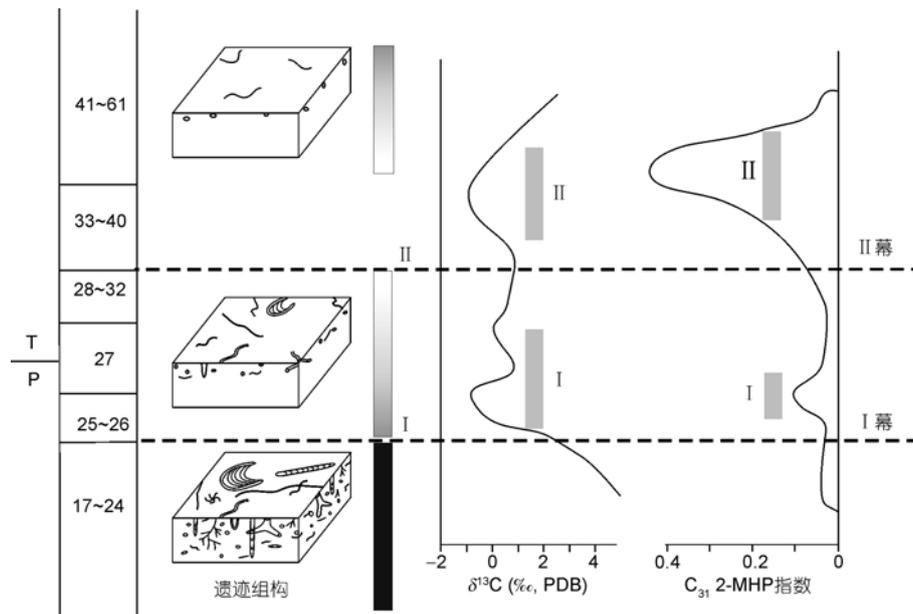


图5 煤山钻孔遗迹组结构与煤山剖面碳同位素及蓝细菌变化对比模式图

$\delta^{13}\text{C}$ 及 C_{31} 2-MHP 指数数据文献[11]

火山活动、甲烷水合物释放、有机质埋藏,以及大洋缺氧等任何一种单一突变事件进行有效解释,因此更有可能是生物与环境相互作用、共同演化的一个综合反馈过程^[15,45,46]。早三叠世初遗迹化石的两幕式变化与碳同位素的两次负漂相互吻合,为生物与环境协同演化提供了有力的证据。

通过对煤山剖面上代表蓝细菌特征与踪迹的生物标志物 C_{31} 2-MHP的测定结果表明,二叠-三叠系界线上下 C_{31} 2-MHP指数亦发生了两幕明显的变化^[10,11,17]:第一幕发生在25~26层,与遗迹化石的第一幕变化对应;第二幕发生在33~39层,与遗迹化石的第二幕变化基本吻合(图5)。目前,对于造成二叠-三叠纪之交蓝细菌繁盛的原因还不能完全确定,目前的解释有二叠纪末动物灭绝造成早三叠世后生动物捕食压力降低^[10,11]、陆地植被崩溃带来营养物质的大量输入^[10,11]、缺氧事件^[44]以及强烈的火山活动造成营养元素的急剧变化及大气 CO_2 含量增加等有关^[17,42,46]。但可以肯定的是,蓝细菌和后生动物之间相互依赖、相互制约、此消彼长,地质历史上,其大量出现在还没有后生动物出现的前寒武纪以及显生宙动物危机时期。经历了显生宙最大灭绝事件的打击,早三叠世初蓝细菌的幕式繁盛与遗迹化石幕式变化相互耦合,表明遗迹化石亦可作为识别环境变

化的标志之一。

煤山钻孔中二叠-三叠系界线附近遗迹化石所指示的底栖生态系的两幕式变化与煤山剖面二叠-三叠系碳同素、蓝细菌指示的陆地和海洋表层生态系统的两幕式变化存在良好的对应关系。虽然目前还不能完全理解它们之间的相互关系和造成这种变化的原因,但至少给我们两个重要启示:其一,古中生代之交的生物危机是地球表层系统中各种生物事件和环境事件长期积累的结果,涉及海洋底层、海洋表层、陆地等各种生态系统;其二,二叠-三叠纪之交环境和生物的变化(即生态系变化)存在频繁波动性和长期性。

5 结论

通过对煤山钻孔的研究,初步得到以下结论:

(1) 长兴期造迹生物的多样性与丰度均已达到相当高的程度,表现为长兴组和殷坑组底部遗迹化石分异度和丰度均较高,结构复杂,生态习性多样,垂向扰动能力强。不过,遗迹潜能总体细小。

(2) 二叠纪末的一系列环境恶化事件,使得遗迹化石在二叠-三叠纪之交发生了二幕式变化,第一幕发生在25~27b区间,第二幕发生在32层与33层之

间,且第一幕较第二幕剧烈,两幕变化使得早三叠世初的遗迹化石变得稀少单调,且以简单细小、平行层面的表生潜穴 *Planolites* 为主,这种遗迹化石极其贫乏和垂向扰动能力低下的现象指示了极低丰度、分异度的生物面貌和二叠纪绝灭事件之后的高压力生态环境。

(3) 遗迹化石的两幕式变化与实体化石反映的两幕式生物灭绝、碳同位素的两幕式负漂、蓝细菌的两幕式泛滥之间存在良好的对应关系。也就是说,遗迹化石作为反映二叠-三叠纪之交的生物和环境事件的独特材料,能够在研究古中生代之交生态系转变及早三叠世生物复苏的过程与机制中发挥重要作用。

致谢 黄俊华、谢树成等老师提供岩芯资料,郭刚参与了岩芯的观察与照相,审稿人提出修改建议,在此一并致谢。

参考文献

- 1 Yin H F, Zhang K X, Tong J N, et al. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. *Episodes*, 2001, 24: 102—114
- 2 金玉玕, 王玥, Henderson C, 等. 二叠系长兴阶全球界线层型剖面和点位. *地层学杂志*, 2007, 31: 101—109
- 3 Jin Y G, Wang Y, Wang W, et al. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic Boundary in South China. *Science*, 2000, 289: 432—436
- 4 Jiang H S, Lai X L, Luo G M, et al. Restudy of conodont zonation and evolution across the P/T boundary at Meishan section, Changxing, Zhejiang, China. *Glob Planet Change*, 2007, 55: 39—55
- 5 Song H J, Tong J N, Chen Z Q. Two episodes of foraminiferal extinction near the Permian-Triassic boundary at the Meishan section, South China. *Aust J Earth Sci*, 2009, 56: 765—773
- 6 Song H J, Tong J N, Zhang K X, et al. Foraminiferal survivors from the Permian-Triassic mass extinction in the Meishan Section, South China. *Palaeoworld*, 2007, 16: 105—119
- 7 Kaiho K, Chen Z Q, Kawahata H, et al. Close-up of the end-Permian mass extinction horizon recorded in the Meishan section, South China: Sedimentary, elemental, and biotic characterization and a negative shift of sulfate sulfur isotope ratio. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 239: 396—405
- 8 金玉玕, 尚庆华, 曹长群. 晚二叠世磁性地层及国际对比意义. *科学通报*, 1999, 44: 800—806
- 9 Mundil R, Ludwig K R, Metcalfe L, et al. Age and timing of the Permian mass extinctions: U/Pb dating of closed-system zircons. *Science*, 2004, 305: 1760—1763
- 10 Xie S C, Pancost R D, Yin H F, et al. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 2005, 434: 494—497
- 11 Xie S C, Pancost R D, Huang J H, et al. Changes in the globe carbon cycle occurred as two episodes during the Permian-Triassic crisis. *Geology*, 2007, 35: 1083—1086
- 12 Xie S C, Pancost R D, Huang J H, et al. Molecular and isotopic evidence for episodic environmental change across the Permo/Triassic boundary at Meishan in South China. *Glob Planet Change*, 2007, 55: 56—65
- 13 曹长群, 郑全锋. 煤山二叠纪-三叠纪过渡期事件地层时序的微观地层记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 52: 1529—1536
- 14 Yin H F, Feng Q L, Lai X L, et al. The protracted Permo-Triassic crisis and multi-episode extinction around the Permian-Triassic boundary. *Glob Planet Change*, 2007, 55: 1—20
- 15 Tong J N, Zhang S X, Zuo J X, et al. Events during Early Triassic recovery from the end-Permian extinction. *Glob Planet Change*, 2007, 55: 66—80
- 16 Chen Z Q, Tong J N, Kaiho K, et al. Onset of biotic and environmental recovery from the end-Permian mass extinction within 1—2 million years: A case study of the Lower Triassic of the Meishan section, South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2007, 252: 176—187
- 17 谢树成, 殷鸿福, 曹长群, 等. 二叠纪-三叠纪之交地球表层系统的多幕式变化: 分子地球生物学记录. *古生物学报*, 2009, 48: 487—496
- 18 Zhang K X, Tong J N, Shi G R, et al. Early Triassic conodont-palynological biostratigraphy of the Meishan D Section in Changxing, Zhejiang Province, South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2007, 252: 4—23
- 19 张克信, 童金南, 殷鸿福, 等. 浙江长兴二叠系-三叠系界线剖面层序地层研究. *地质学报*, 1996, 70: 270—281
- 20 郑全锋. 浙江省长兴县煤山剖面二叠系-三叠系界线层序的沉积微相特征及层序地层划分. *地层学杂志*, 2006, 30: 373—383

- 21 Pemberton S G, Frey R W. Trace fossils nomenclature and the *Planolites-Palaeophycus* dilemma. *J Paleontol*, 1982, 56: 843—881
- 22 杨式溥, 张建平, 杨美芳. 中国遗迹化石. 北京: 科学出版社, 2004. 1—263
- 23 Häntzschel W. Trace fossils and problematica. In: Teichert C, ed. *Tratise on Invertebrate Paleontology, Part W, Miscellanea, Suppl. 1*. Lawrence: Geological Society of America and University of Kansas Press, 1975. 1—269
- 24 Fillion D, Pickerill R K. Ichnology of the Upper Cambrian? To Lower Ordovician Bell Island and Wabana groups of eastern Newfoundland, Canada. *Palaeont Canad*, 1990, 7: 1—83
- 25 Bromley R G, Frey R W. Redescription of the trace fossils *Gyrolites*, and taxonomic evaluation of *Thalassinoides*, *Ophimorpha* and *Spongelimorpha*. *Bull Geol Soc Denmark*, 1974, 23: 311—335
- 26 Sheehan P M, Schiefelbein D R J. The trace fossils *Thalassinoides* from the Upper Ordovician of the Eastern Great Basin: Deep burrowing in the Early Paleozoic. *J Paleontol*, 1984, 58: 440—447
- 27 Droser M, Bottjer D J. A semi-quantitative field classification of ichnofabrics. *J Sediment Petrol*, 1986, 56: 558—559
- 28 Taylor A A, Goldring G R. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric. *J Geol Soc*, 1993, 150: 141—148
- 29 Simpson S. On the trace fossils *Chondrites*. *Quart J Geol Soc London*, 1957, 107: 475—499
- 30 Bromley R G, Ekdale A A. *Chondrites*: A trace fossils indicator of anoxia in sediments. *Science*, 1984, 224: 872—874
- 31 Seilacher A. Bathymetry of trace fossils. *Mar Geol*, 1967, 5: 413—428
- 32 龚一鸣. 遗迹化石 *Chondrites* 的指相意义和阶层分布. *古生物学报*, 2004, 43: 94—102
- 33 Bromley R G, Ekdale A A. Composite ichnofabrics and tiering of burrows. *Geol Mag*, 1986, 123: 59—65
- 34 Keswani A D, Pemberton S G. Sedimentology, ichnology, and paleoecology of the Mississippian midale carbonate in the Williston Basin, Radville area, Saskatchewan: Preliminary interpretations. In: Karvonen R, ed. *Guidebook of Core Workshop (Carboniferous to Jurassic Pangea Conference)*. Alberta: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1993. 206—228
- 35 Orr P J. Trace fossil tiering within event beds and preservation of frozen profiles: An example from the Lower Carboniferous of Menorca. *Palaios*, 1994, 9: 202—210
- 36 Gong Y M. Flysch trace fossils from the Hercynian and Indosinian orogenic belts of the northwestern China and their palaeo environmental significance. *Acta Geol Sin*, 1999, 73: 384—394
- 37 杨遵仪, 吴顺宝, 殷鸿福, 等. 华南二叠-三叠纪过渡期地质事件. 北京: 地质出版社, 1991. 1—190
- 38 Chen, Z Q, Tong J N, Zhang, K X, et al. Environmental and biotic turnover across Permian-Triassic boundary from shallow carbonate platform in western Zhejiang, South China. *Aust J Earth Sci*, 2009, 56: 775—797
- 39 Twitchett R J, Wignall P B. Trace fossils and the aftermath of the Permo-Triassic mass extinction: Evidence from northern Italy. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1996, 124: 137—151
- 40 Schubert J K, Bottjer D J. Early Triassic stromatolites as post-mass extinction disaster forms. *Geology*, 1992, 20: 883—886
- 41 王约, 王训练, 史晓颖. 贵州独山地区晚泥盆世 F-F 生物灭绝后的先驱生物及其在生态系统重建过程中的意义. *中国科学D辑: 地球科学*, 2006, 36: 305—315
- 42 赵小明, 童金南, 姚华舟, 等. 华南早三叠世错时相沉积及其对复苏期生态系的启示. *中国科学D辑: 地球科学*, 2008, 38: 1564—1574
- 43 Stanley S M. Delayed recovery and the spacing of major extinctions. *Paleobiology*, 1990, 16: 401—414
- 44 Cao C Q, Love G D, Hays L E, et al. Biogeochemical evidence for euxinic oceans and ecological disturbance presaging the end-Permian mass extinction event. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 281: 188—201
- 45 Knoll A H, Bambach R K, Payne J L, et al. Paleophysiology and end-Permian mass extinction. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 256: 295—313
- 46 戎嘉余, 方宗杰. 生物大灭绝与复苏——来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004. 1—1027