

doi:10.3799/dqkx.2012.078

洛阳龙门地区中寒武统张夏组 下部遗迹组构及其沉积环境

齐永安, 王敏, 李姐, 孙长彦, 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 454000

摘要: 洛阳龙门地区中寒武统张夏组为一套富含生物扰动的薄层微晶灰岩和厚层鲕粒灰岩沉积, 根据沉积学和遗迹学特征, 从中识别出6个遗迹组构, 从下到上依次是: 潮下低能碳酸盐岩台地中的*Planolites montanus* 遗迹组构, 潮下浅水较高能碳酸盐岩台地中的*Palaeophycus tubularis-Thalassinoides horizontalis* 遗迹组构, 高、低能交替的滨岸浅滩或开阔台地滩间坪或滩前沉积中的*Skolithos linearis-Planolites montanus* 遗迹组构, 深水低能开阔台地沉积中的模糊生物扰动遗迹组构, 高能鲕粒浅滩中的*Macaronichnus segregatis* 遗迹组构和潮下低能局限台地环境中的*Palaeophycus heberti* 遗迹组构。龙门地区张夏组由无鲕粒滩的碳酸盐岩台地逐渐向发育厚层鲕粒滩的碳酸盐岩台地演化, 沉积环境从滨岸浅滩逐渐演变为无鲕粒滩的开阔台地, 并随着海退由深水、开阔台地逐渐变浅形成鲕粒滩、局限台地。

关键词: 遗迹组构; 生物扰动; 碳酸盐岩; 中寒武统; 张夏组; 沉积学; 地层学。

中图分类号: P531

文章编号: 1000-2383(2012)04-0693-14

收稿日期: 2011-12-13

Ichnofabrics and Their Sedimentary Environments from the Lower Part of the Middle Cambrian Zhangxia Formation, Longmen Area, Luoyang City

QI Yong-an, WANG Min, LI Da, SUN Chang-yan, DAI Ming-yue

Key Laboratory of Biogenic Traces and Sedimentary Minerals of Henan Province, Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract: The Zhangxia Formation in the Longmen area, Luoyang City, was a set of deposited thin-bedded microcrystalline limestone and thick-bedded oolitic limestone, with abundant bioturbation. Based on sedimentology and ichnology characteristics, six ichnofabrics were determined, namely from the bottom up, *Planolites montanus* ichnofabric in low energy, subtidal carbonate platform; *Palaeophycus tubularis-Thalassinoides horizontalis* ichnofabric in shallow, medium energy, subtidal carbonate platform; *Skolithos linearis-Planolites montanus* ichnofabric in onshore oolitic shoals, inter flat and fore shoals of oolitic platform with alternation of high and low energy; blurry bioturbation ichnofabric in deeper water, lower energy of open platform; *Macaronichnus segregatis* ichnofabric in oolitic shoals with high energy and *Palaeophycus heberti* ichnofabric in subtidal restricted platform with low energy. Zhangxia Formation in Longmen area developed from carbonate platform without oolitic shoals to with oolitic shoals. The sedimentary environment evolved from onshore oolitic shoals to open platform without oolitic shoals, and finally ended up with platform oolitic shoals and restricted platform with the regression.

Key words: ichnofabric; bioturbation; carbonate rock; Middle Cambrian; Zhangxia Formation; sedimentology; stratigraphy.

遗迹组构是指沉积物(岩石)中生物扰动和生物侵蚀作用所遗留下来的总体结构和内部构造特征, 是各期扰动生物在沉积物中活动历史的最终记录,

它是物理过程和生物过程相互作用的产物(Ekdale and Bromley, 1983)。遗迹组构的属性由沉积基底的物理、化学和生态性质(沉积底质硬度、颗粒粒度、

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41072003); 河南省基础与前沿项目(No. 112300413213); 高校博士点基金博导类联合课题(No. 20114116110001); 河南理工大学优秀博士学位论文培育基金(No. 2011011001); 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室开放基金(No. OTMP1003)。

作者简介: 齐永安(1963—), 男, 教授, 现从事遗迹化石与沉积学研究. E-mail: qiya@hpu.edu.cn

沉积速率、氧含量、营养物质、盐度、生态学、群落结构等)、以及造迹生物在沉积基底上的各种生命活动共同决定(Taylor *et al.*, 2003). 从 4 个方面对一个遗迹组构进行描述: 物理沉积构造、生物扰动指数(BI)、潜穴大小和丰度以及遗迹化石分异度(Taylor and Goldring, 1993). 与传统的遗迹化石研究方法不同, 遗迹组构分析更强调生物活动与沉积物之间的相互关系. 特别是将底栖生物群落垂向分带的概念应用到遗迹组构的研究中以后(Bromley and Ekdale, 1986), 遗迹学研究不再局限于遗迹化石的识别、鉴定和解释, 而扩展到沉积物中遗迹化石之间在时间和空间上的相互关系, 以及不同深度(或世代阶层)遗迹化石的保存可能性与特定条件等方面(Savrda, 2007). 加上对无法辨认形态的生物扰动基底的重视, 遗迹组构分析更能充分利用沉积物中的遗迹学信息, 因而更能精确地解释沉积环境.

中寒武统张夏组的典型剖面在山东长清县张夏镇(袁金良等, 2000), 张夏组在华北地区都有不同程度的出露. 目前, 对张夏组的研究主要集中在古生物化石(张文堂, 1963; 刘怀书等, 1987)和碳酸盐岩微相分析(吕钊炜等, 2009; 张旭等, 2009)、沉积相划分(江茂生和沙庆安, 1996)、沉积旋回性分析(苏德辰

等, 1995; 梅冥相等, 1997; 梅冥相和梅仕龙, 1997; 张国仁等, 1997; 陈建强等, 1998)等方面, 而张夏组整个剖面中丰富的遗迹化石和生物扰动却往往被忽视. 本文以洛阳龙门地区张夏组为研究对象, 通过遗迹组构的描述与分析来阐述张夏组沉积特征.

1 地质背景

龙门石窟坐落在河南省洛阳市南 13 km 处的龙门镇. 在这里, 伊水缓缓北流, 东、西两座青山对峙, 分别为东山石窟(属于龙门山)和西山石窟(属于香山). 香山和龙门山位于华北板块南缘和秦岭一大别山造山带北麓与吕梁—太行山东北隆起的交汇处, 构造演化分为 3 个阶段: 印支期碰撞造山阶段、燕山晚期陆内造山阶段和燕山末期—喜马拉雅早期走滑拉张阶段. 构造演化不仅受秦岭造山带 NE 向逆冲推覆构造的控制, 还受吕梁隆起和太平洋板块向亚洲板块俯冲引起的扩张运动和走滑运动的影响(图 1a, 1b)(解东宁等, 2006).

洛阳地区寒武系比较连续(图 1c): 下寒武统出露约 250 m, 包括辛集组和馒头组 I 段($\epsilon_{1x}+m$); 中寒武统 170~520 m, 包括馒头组 II 段($\epsilon_2 m^2$)、III

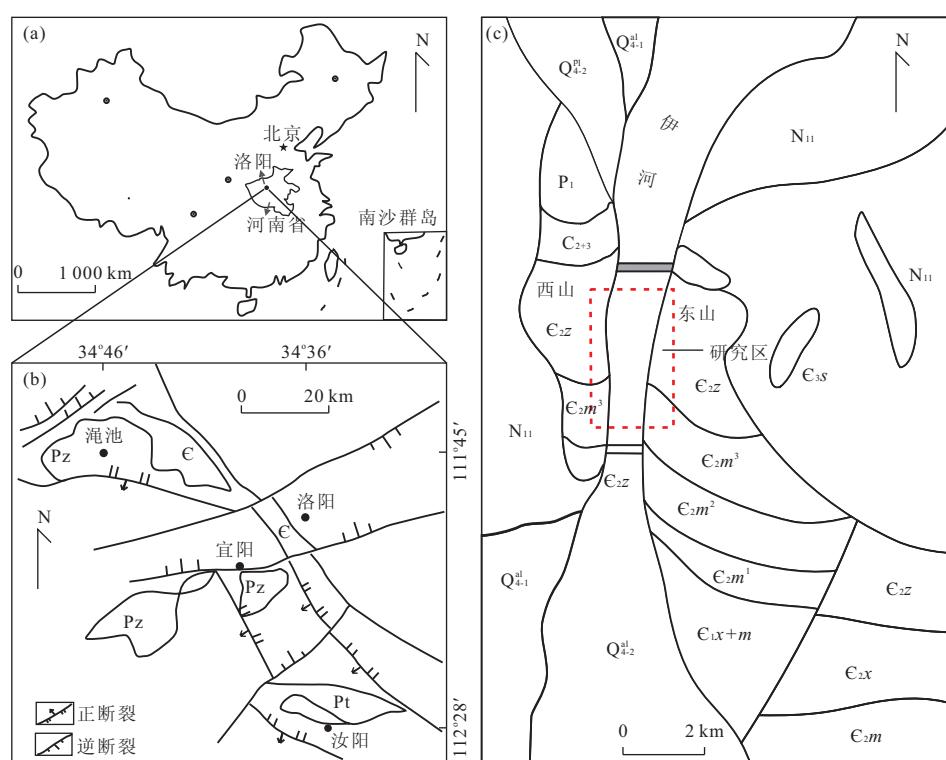


图 1 洛阳龙门地区的地理位置与地质特征

Fig. 1 Geographic location and geological map of Longmen area, Luoyang city

段($\epsilon_2 m^3$)和张夏组($\epsilon_2 z$);上寒武统三山子组($\epsilon_3 s$),厚300 m.

龙门石窟寒武系主要由中寒武统张夏组组成,出露完好且连续,与下伏中寒武统馒头组Ⅲ段及上覆上寒武统三山子组均为整合接触。张夏组下部(厚133 m)主要由薄层微晶灰岩和厚层的鲕粒灰岩组成,含有丰富的生物扰动、内源砾屑灰岩和生物碎屑等,上部是大套厚层的鲕粒白云岩,几乎无生物扰动。因此,本文选取张夏组下部含丰富的生物扰动灰岩为研究对象。

2 遗迹组构

根据沉积学和遗迹学特征,研究区识别出了6个遗迹组构,分别是:*Planolites montanus* 遗迹组构、*Palaeophycus tubularis-Thalassinoides horizontis* 遗迹组构、*Skolithos linearis-Planolites montanus* 遗迹组构、模糊生物扰动遗迹组构、*Macaronichnus segregatis* 遗迹组构、*Palaeophycus heberti* 遗迹组构。各遗迹组构生物扰动指数的计算依据Taylor and Goldring(1993)提出的根据相对于原始沉积组构的改造量而划分的生物扰动等级。

2.1 *Planolites montanus (Pm)* 遗迹组构

特征描述:该遗迹组构分布在张夏组的底部7.9 m的浅灰色平板状薄层微晶灰岩与深灰绿色泥岩薄互层和中下部5.3 m薄层微晶灰岩与土黄色灰泥岩薄互层中(图2d)。该遗迹组构由单一的遗迹化石*Planolites montanus* 组成,且严格分布在灰岩层面上,丰度非常低,细小的遗迹化石零星地分布在层面上(图2a、2c,黑箭头所示),层面生物扰动等级(BPBI)(Miller and Smail, 1997)为2,而垂向上没有发现任何对层理的扰动破坏,剖面BI=0。*Planolites montanus* 是直或略弯曲的水平简单潜穴,直径为2~4 mm,延伸长度为1~3 cm,潜穴填充物是比围岩略深的微晶灰岩(图2a、2c,黑箭头所示)。该套地层还夹有5层(6~25 cm)竹叶状灰岩层、7层(3~36 cm)砂屑层或生物滞积层。生物实体化石主要是三叶虫颊刺和软舌螺类,在片状页岩中还发现有少量较完整的三叶虫头鞍、胸节(图2a、2b,白箭头所示)。竹叶状砾屑呈扁平状,多为水平或者近水平排列,局部堆积呈人字形或菊花状排列,或直立及高角度倾斜,磨圆度高,分选性好。

成因解释:薄板状微晶灰岩与泥岩或泥灰岩薄互层这种岩性特点及垂向生物扰动的缺乏为竹叶状砾屑灰岩的形成提供了内在条件(Wignall and

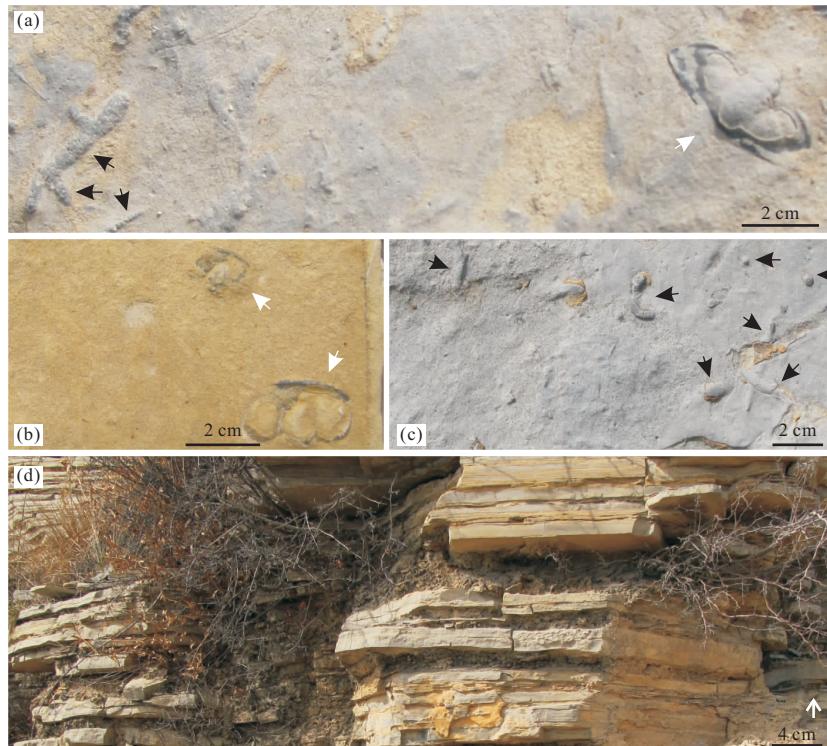


图2 *Planolites montanus* 遗迹组构野外照片(a、b、c为平面照片; d为剖面照片)

Fig. 2 Field photographs of *Planolites montanus* ichnofabric

Twitchett, 1999). 垂向生物扰动的缺乏导致沉积物混合程度低、沉积物—水界面之下浅层沉积物的孔隙度和含水饱和度均较低, 这对薄板状微晶灰岩发生早期海底胶结和成岩作用提供了必要条件。潮汐和风暴浪作用搅动胶结和成岩的薄板状微晶灰岩与泥岩或泥灰岩薄互层沉积物形成了竹叶状砾屑灰岩。薄板状岩性、水平生物扰动和较完整的三叶虫头鞍等表明沉积作用发生在潮下低能环境(陈吉涛等, 2009)。综上所述, 该遗迹组构形成于浪基面之下和风暴浪基面之上的碳酸盐岩台地潮下低能环境, 但常遭受强风暴流的影响。

2.2 *Palaeophycus tubularis-Thalassinoides horizontalis* (P-T) 遗迹组构

特征描述: 该遗迹组构分布在剖面的中下部, 共厚 21.5 m, 岩性为浅灰白色微晶灰岩夹极薄层浅土黄色泥质灰岩, 其中浅灰白色微晶灰岩层单层厚度 1~5 cm, 层面多平整, 中间夹的浅土黄色泥质灰岩厚 0.3~0.5 cm, 有较小的波状起伏。该遗迹组构垂向上的生物扰动从弱到中等强度, BI 通常为 1~3 (图 3a、3b、3c), 而平面上生物扰动量则较大, BPBI

通常为 2~3。遗迹分异度高, 能识别出的遗迹化石较多, 有 *Palaeophycus tubularis*(图 3e)、*Thalassinoides horizontalis*(图 3d)、*Thalassinoides* isp. (图 3f)、*Skolithos linearis*(图 3a)、*Arenicolites* isp. (图 3b) 和 *Planolites* isp..

Palaeophycus tubularis 多为水平或近水平分布在微晶灰岩层面上的简单的管状构造(图 3e), 没有衬壁或潜穴壁, 填充物为上覆地层土黄色泥岩或亮晶方解石; 潜穴直径 4~6 mm, 水平延伸长度为 2~10 cm. *Thalassinoides horizontalis*(图 3d) 为三维潜穴系统, 在水平面上呈网状分支构造, 分支呈 Y- 或 T-型, 潜穴平均直径为 6.5 mm, 整体上直径变化不大, 在分支处稍有膨大现象, 潜穴无衬壁, 边界与围岩十分平滑清晰, 填充物为土黄色泥岩; 在剖面中, 潜穴管以垂直或高角度分布, 常见不规则分支现象, 与围岩界限不太明确, 影响的地层厚度不大, 一般为 2~3 cm. *Thalassinoides* isp. (图 3f) 在平面上以自由分支形成的水平网状为主, 分支呈 Y-、T-型。潜穴的直径 7~11 mm, 单个分支长度通常为 10~50 cm. 潜穴有填充物潜穴壁之分: 潜穴壁为较围岩

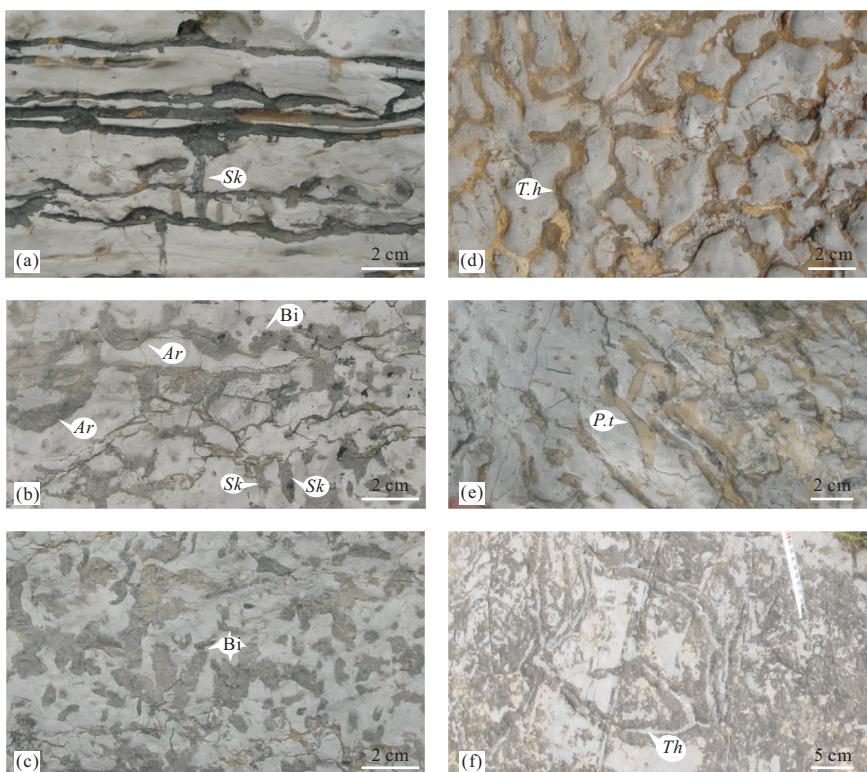


图 3 *Palaeophycus tubularis-Thalassinoides horizontalis* 遗迹组构的野外照片

Fig. 3 Field photographs of *Palaeophycus tubularis-Thalassinoides horizontalis* ichnofabric

a, b, c 均为剖面照片, 分别展示了遗迹组构扰动指数 $BI=1, 2, 3$; d, e, f 为平面照片; Sk. *Skolithos linearis*; Ar. *Arenicolites* isp.; Bi. 无法识别的生物扰动; T. h. *Thalassinoides horizontalis*; P. t. *Palaeophycus tubularis*; Th. *Thalassinoides* isp.

致密的灰岩,表面并不光滑,有纵向抓痕,厚通常为1~3 mm不等;而潜穴填充物为亮晶方解石,直径为6~8 mm。*Skolithos linearis* 为短小的垂直针状潜穴(图3a),直径多为3~5 mm,垂向延伸多为1~2 cm,填充物为较围岩深的微晶方解石。*Arenicolites* isp. 为垂直于层面的宽而扁的U型潜穴,但在剖面上暴露出的形态只有少数为U型、多为倾斜的J-I型(图3b左上),其直径为5~8 mm,垂向深度为1~3 cm;潜穴填充物为较围岩深的微晶方解石或上覆地层的灰质泥岩。

该遗迹组构生物扰动强度中等, BI为1~3(图3a、3b、3c)。BI=1的遗迹组构主要分布在剖面的底部,微晶灰岩层和泥质灰岩层较完整,生物扰动弱,多为水平生物扰动,偶尔有垂向或高角度倾斜的潜穴孤立出现,潜穴填充物多为深灰色亮晶方解石,生物碎屑也很少。BI=2和BI=3的遗迹组构分布在剖面的中下部,该遗迹组构中所有的遗迹化石均出现,但仍以水平生物扰动占优势,*Palaeophycus tubularis*、*Thalassinoides horizontalis*、*Thalassinoides* isp. 在层面上大量发育;垂向上生物扰动强度弱到中等,扰动深度不大,一般为1~3 cm,以短

小的 *Skolithos linearis* 和 *Arenicolites* isp. 为主,偶尔有 *Thalassinoides* 的垂向管道;生物碎屑也较丰富,以三叶虫、软舌螺和古杯类为主,局部可见完整的化石个体。

成因解释:该遗迹组构保存在微晶灰岩夹泥质灰岩中,鲕粒灰岩不发育,砂屑和砾屑灰岩仅在该遗迹组构的中上部断续出现,且厚度薄;遗迹组构以水平生物扰动为主,扰动量从弱到中等,遗迹分异度高;伴生的生物碎屑也较为丰富,局部可见完整的化石个体。根据上述特征,该遗迹组构形成于鲕粒滩不发育、与广海连通性较好、且时常受到风暴流影响的无鲕粒滩碳酸盐岩台地较浅水区。

2.3 *Skolithos linearis*-*Planolites montanus* (S-P) 遗迹组构

特征描述:该遗迹组构分布在剖面中部,形成于深灰色薄层鲕粒灰岩与浅灰色薄层微晶灰岩互层沉积中(图4c),总厚度为21.3 m。其遗迹化石组分子有 *Skolithos linearis* 和 *Planolites montanus*。*Skolithos linearis* 是垂直或高角度倾斜分布的管状构造,直或略弯曲,直径通常为4~6 mm,长度一般为1~2 cm,保存在微晶灰岩层中,潜穴开口总是与

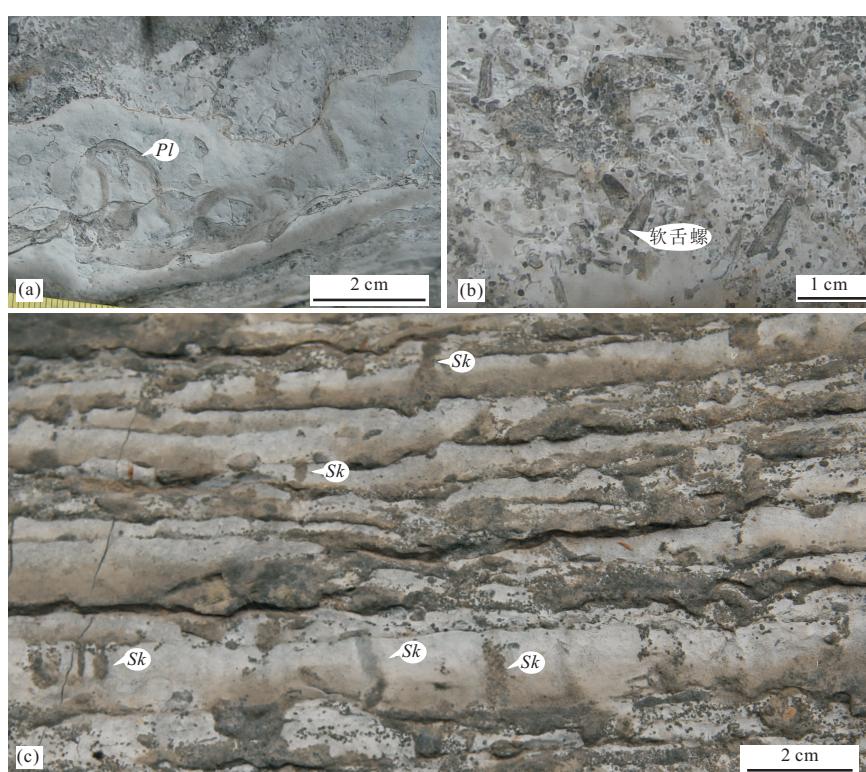


图4 *Skolithos linearis*-*Planolites montanus* 遗迹组构的野外照片

Fig. 4 Field photographs of *Skolithos linearis*-*Planolites montanus* ichnofabric

a. 微晶灰岩层面上的 *Planolites montanus* (Pl); b. 鲰粒灰岩层面上的生物碎屑(软舌螺); c. 剖面中的 *Skolithos linearis* (Sk)

上覆地层的鲕粒灰岩层相通,填充物为鲕粒灰岩或颜色较深的亮晶方解石(图 4c). 水平分布的简单管状潜穴 *Planolites montanus* 填充为微晶灰泥(图 4a), 直径 3~5 mm, 延伸长度为 2~3 cm. 偶尔在微晶灰岩层面上发现 *Skolithos* 交切 *Planolites*, *Planolites* 之间也有叠覆现象. 该遗迹组构的垂向生物扰动主要是由 *Skolithos* 引起的, 总体生物扰动量低, 通常为 5% 左右, BI 为 1 或 2. 微晶灰岩平面上的生物扰动主要是由 *Planolites* 引起的, *Skolithos* 也有一定的贡献, 平面生物扰动量也比较低, 通常为 4%, 平面生物扰动指数(BPBI)为 2.

深灰色鲕粒灰岩层与浅灰色微晶灰岩层近等厚旋回分布, 单层厚度为 1~2 cm, 二者之间的界面凹凸不平, 酾粒灰岩层有时呈断续状分布. 酏粒灰岩层含有大量的生物碎屑, 主要是软舌螺和三叶虫唇瓣、棘胸节碎片等(图 4b); 遗迹化石主要出现在微晶灰岩层内和层面上. 另外, 该遗迹组构还发育有多层厚度为 3~10 cm 的竹叶状鲕粒灰岩层和砾屑灰岩层, 局部还发育厚度为 1~5 cm 的核形石层, 核形石多呈椭圆状, 可以清晰地看到同心圈层.

成因解释: *Skolithos* 长度短小, 总是从鲕粒层向下延伸到下伏微晶灰岩层, 但是没有穿越下一个鲕粒灰岩层. *Skolithos* 为层内居住潜穴, 其造迹生物为了躲避动荡的水体或食敌而向沉积物中掘穴并长期居住其中, 滤食水体中的营养物质. 当造迹生物死亡或逃逸后, 留下的开放潜穴被上覆鲕粒灰岩所充填. 垂直潜穴、鲕粒灰岩、核形石以及大量的生物

碎屑无疑是高能动荡沉积环境的指示标志. 因此, 薄层深色鲕粒灰岩层的形成环境为高能滨岸浅滩环境. *Planolites* 仅存在于微晶灰岩层面上, 该遗迹化石是一种层面进食潜穴, 形成于静水或低水动力的沉积环境中. 由此可见, 该遗迹组构形成于高、低能交替的滨岸浅滩或开阔台地滩间坪或滩前沉积中.

2.4 模糊生物扰动(Bi)遗迹组构

特征描述: 其总体特征是扰动量大, 生物扰动构造与围岩的颜色和岩性相似、但与围岩的边界模糊. 单个遗迹化石几乎无法识别(图 5), 偶尔可见高角度倾斜的 *Palaeophycus heberti* 和水平分布的 *Planolites montanus*. 该遗迹组构总体扰动强度高, 扰动指数 BI 为 2~5(图 5). BI=2 和 BI=3 的遗迹组构分布在一套厚度为 6~23 cm 的浅灰色微晶灰岩与浅土灰色泥质灰岩薄互层的岩性中, 层面较平直, 生物扰动在剖面上呈模糊的扰动, 为浅土灰色泥质灰岩填充; BI=4 和 BI=5 的遗迹组构发育在一套厚 7~36 cm 的厚层泥质灰岩中, 看不到任何层理或薄层, 生物扰动对其物理沉积进行了较完全的改造.

该类型的生物扰动分布在厚层鲕粒灰岩的下伏地层中, 总厚度为 15.2 m, 中间夹多期受风暴搅动的含鲕粒砾屑灰岩层. 砾屑灰岩层厚度在 3~21 cm 不等, 底面呈凹凸不平的侵蚀填充状态, 砾屑的磨圆度和分选性均较差, 向上逐渐过渡为含鲕粒的灰岩. 生物扰动从内碎屑层的顶部开始出现, 且向上扰动逐渐增强.

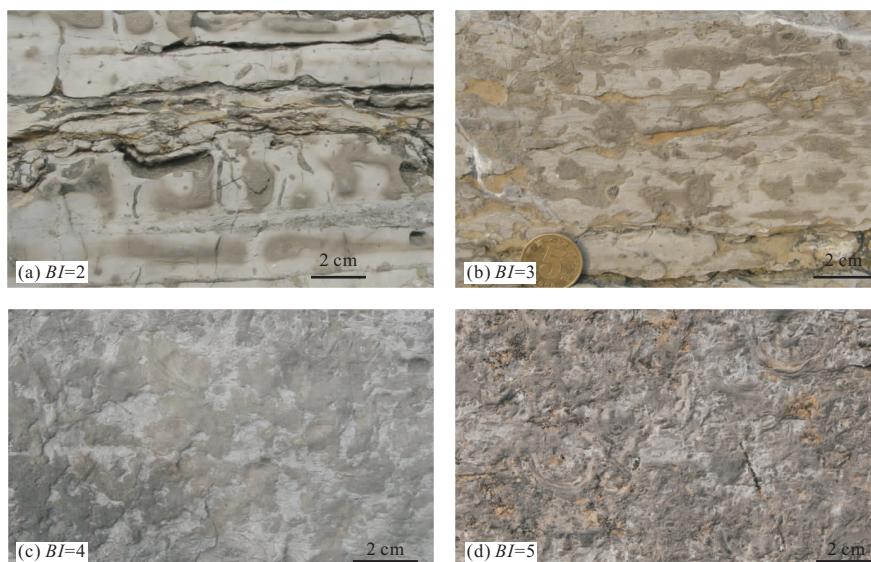


图 5 模糊生物扰动遗迹组构扰动等级野外照片(a,b,c,d 为垂直剖面照片)
Fig. 5 Field photographs of bioturbation index (BI) of blurry bioturbation ichnofabric

成因解释:该套地层以发育强烈的模糊生物扰动泥晶灰岩为特征,生物扰动形态模糊,单个遗迹化石难以识别,说明生存环境十分稳定,生物殖居窗时间长,造迹生物有充足的时间对沉积物进行扰动改造,完全破坏了原生沉积构造,留下了厚层的强烈模糊生物扰动构造。含鲕粒砾屑灰岩层厚度小、层厚不稳定,砾屑个体小,磨圆度中等,分选性差,呈不明显的正粒序堆积。因此,该遗迹组构形成于风暴浪基面附近、且偶尔被远源风暴干扰的深水开阔台地沉积中。

2.5 *Macaronichnus segregatis* (Ms) 遗迹组构

特征描述:*Macaronichnus segregatis* 遗迹组构由单种遗迹化石 *Macaronichnus segregatis* 组成。*M. segregatis* 是直或微弯曲的简单管状潜穴,水平或近水平分布,在层面上任意方向延伸,无定向性,潜穴之间常叠覆但未见分叉现象(图 6a);在剖面上,潜穴多呈圆点或椭圆状,偶尔发现有平行于层面的条带状(图 6b)。潜穴直径较均一,为 5~6 mm,延伸长度为 4~7 cm。潜穴由浅灰色白云质泥质灰岩组成,其中分散有少量的单个鲕粒,与围岩深灰色的鲕粒灰岩差异明显;潜穴没有衬壁,但边缘被一层颜色较深的鲕粒膜包裹(图 6a),边缘鲕粒的长轴往往与潜穴管长轴近乎平

行。遗迹组构扰动强度较低,在整个地层中扰动强度变化不大,平均扰动指数为 1~2。

发育 *M. segregatis* 遗迹组构的围岩风化面上为深浅交替的厚层条带状鲕粒灰岩。偏光显微镜下,其鲕粒类型以放射—同心鲕(核心是生物碎屑、矿物颗粒及砂屑)为主、少量的白云石化鲕、微晶鲕、同心鲕、纯放射鲕和单晶或多晶鲕(鲕铸模)。鲕粒之间为亮晶方解石填充。与鲕粒伴生的还有少量三叶虫碎片、介形虫介壳、腹足动物介壳,这些生物碎屑零散地分布在鲕粒灰岩中,有时与遗迹化石同层分布,但没有交切关系。

成因解释:*M. segregatis* 遗迹组构分布在张夏组上部 13 层厚度不等(8~31 m)的条带状厚层鲕粒灰岩中,总厚度为 36.9 m,中间夹杂 7 层厚度不等的 *Palaeophycus heberti* 遗迹组构和 5 层(共厚 1.5 m)模糊生物扰动遗迹组构。*M. segregatis* 为层内进食潜穴,潜穴外侧发育暗色的潜穴膜,由鲕粒聚集而成。其潜穴形态与现代多毛虫类 *Ophelia limacine* 和 *Euzonus* 非常相似(Clifton and Thompson, 1978; Gingras et al., 2002; Pemberton et al., 2003; Seike, 2007)。*Euzonus* 蠕虫是能够应对高能海滩环境的非常稀少的觅食者之一,大多数现代

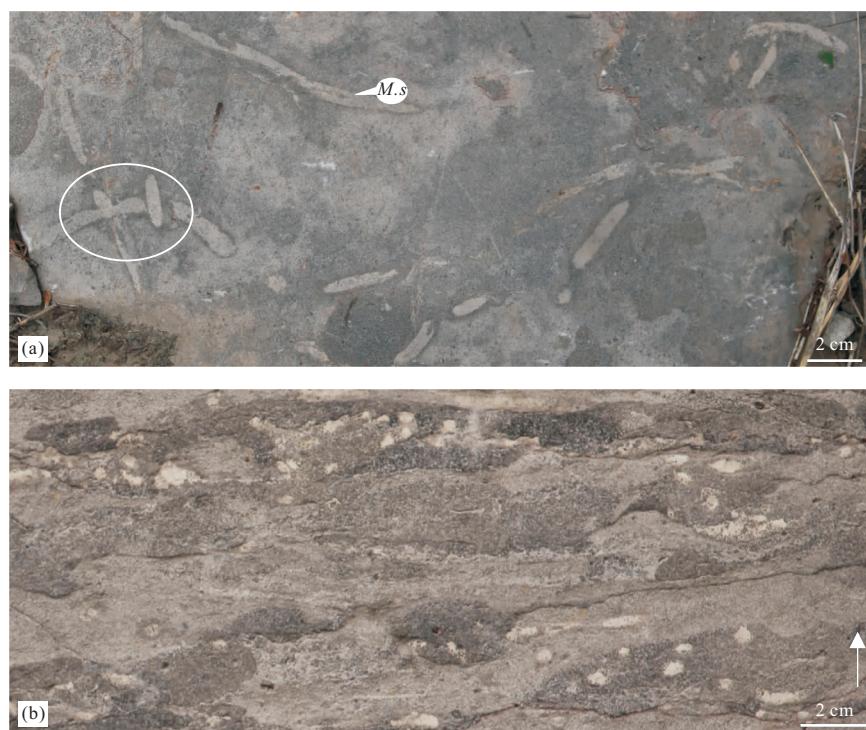


图 6 *Macaronichnus segregatis* 遗迹组构的野外照片

Fig. 6 Field photographs of *Macaronichnus segregatis* ichnofabric

a. 平面上 *M. segregatis* 呈水平管状、有叠覆现象(椭圆标记);b. 垂直剖面上 *M. segregatis* 呈点状分布

Euzonus 种仅栖息在广阔沙滩中的前滨中部很狭窄的区域, 并且在这种动荡、不稳定的沙滩环境中, 这种动物能够应对不断迁移的前滩沙体而水平地向海或者陆地方向相应迁移(Seike, 2008)。在地质记录中, *M. segregatis* 常保存在细粒交错层理砂岩沉积中, 常与大型交错层理相伴生, 被 *M. segregatis* 大面积扰动的砂岩具有各种高能潮汐或波浪特征, 主要产于前滨、临滨砂坝或滨外潮汐陆架砂波相(Clifton and Thompson, 1978; Seike, 2009)。

研究区 *M. segregatis* 遗迹生物的生活习性与现代 *Euzonus* 很相似。层内进食潜穴充填物与围岩不同、发育颗粒物聚集形成的潜穴膜、单种遗迹化石的繁盛等特点说明 *M. segregatis* 为机会种留下的机会遗迹组构, 形成于与现代 *Euzonus* 相似的动荡环境中。遗迹生物的生活分为 2 个阶段: 短暂的幼虫期为浮游生活, 随动荡的水体来回运动, 便于其在空间上迅速扩散, 由于其体积小、体重轻, 波浪对其没

有破坏作用; 当发育到成虫阶段, 体积、体重、觅食方式都发生了变化, 动物在沉积物表面浅处营层内进食生活。其同种生物个体发育到成熟后个体差别不大, 直径近乎相同, 这很好地解释了笔者在该遗迹组构中发现的 *M. segregatis* 直径比较均一的现象。研究区 *M. segregatis* 在层面上的分布没有定向性, 是波浪在潮下浅滩环境中的无定向搅动对沉积底质影响的结果, 而与日本现代前滨中上部定向波浪的搅动造成 *M. segregatis* 潜穴定向分布(Seike, 2007)有明显的不同。因此, *M. segregatis* 遗迹组构形成于开阔台地高能动荡颗粒滩环境中, 由多毛类留下的机会遗迹组构。

2.6 *Palaeophycus heberti* (Ph) 遗迹组构

特征描述: *Palaeophycus heberti* 遗迹组构由单一的遗迹化石 *Palaeophycus heberti* 组成。*Palaeophycus heberti* 为发育厚衬壁的管状潜穴, 在地层中多密集分布, 偶尔排列成簇状(图 7b), 化石产状多

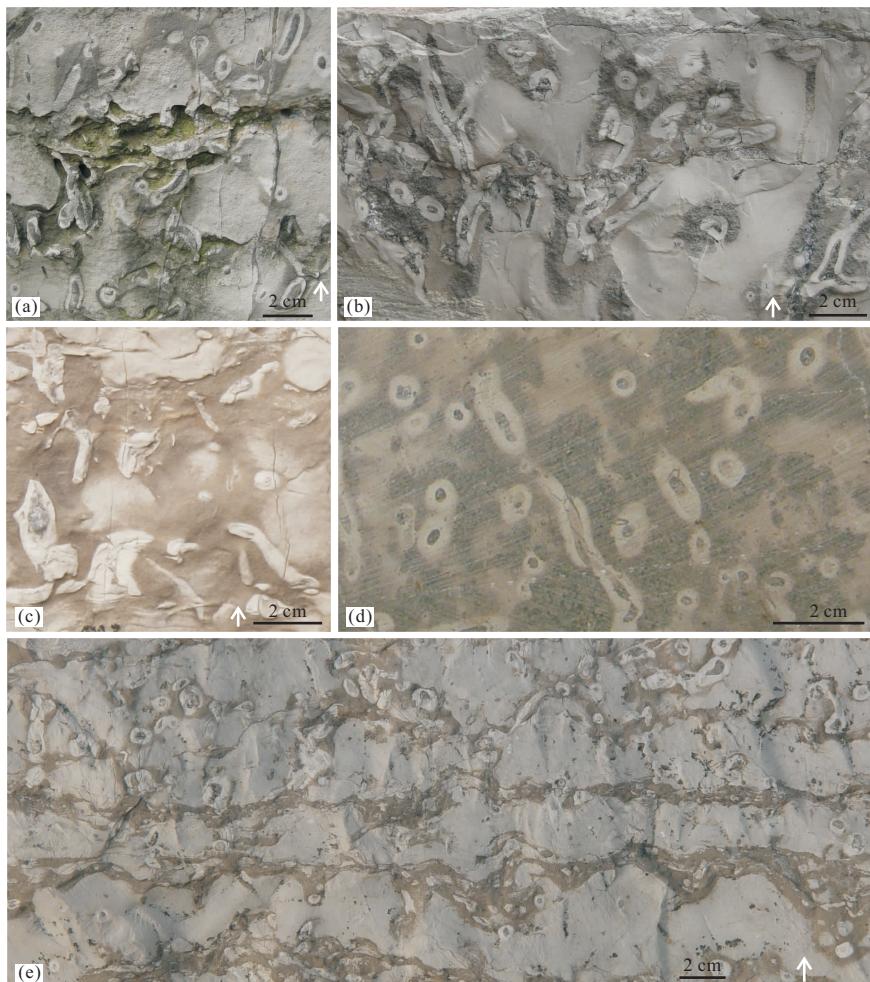


图 7 *Palaeophycus heberti* 遗迹组构的野外照片(a, b, c, e 均为垂直剖面照片;d 为水平层面照片)

Fig. 7 Field photographs of *Palaeophycus heberti* ichnofabric

样,以高角度倾斜和垂直于层面分布为主(图 7a~7c),少数呈水平或近水平分布(图 7d). 潜穴在层面上呈圆点状、椭圆状,少数呈条带状(图 7d),剖面上多为 I-、J-、少数组呈 Y-型分支(图 7a~7c);潜穴管直径变化较大(图 7c),直径从不到 1 mm 到 10 mm 不等,其中以直径 4~7 mm 为主,延伸长度通常为 3~4 cm,少数达 7 cm. 潜穴管由内侧的深灰色潜穴填充物和外侧的灰白色衬壁两部分组成,潜穴填充物直径通常为 3 mm,为深灰色亮晶方解石;而衬壁的厚度为 1~2 mm,由灰白色微晶或泥晶方解石组成. 潜穴大小无定向排列,说明它们是多个动物所造,而非一个动物连续掘穴的结果. 潜穴局部有分叉,但没有发现任何叠覆现象. 该遗迹组构在张夏组上部 7 个层段中生物扰动量变化较大,生物扰动指数 BI 为 0~3,生物扰动量最低只有 2%,而局部层位最高可达 36%.

Palaeophycus heberti 遗迹组构分布在张夏组上部,发育在 7 层厚度不等的微晶灰岩夹极薄层白云质灰岩旋回沉积中,总厚度为 4.5 m(图 7e). 浅灰白色微晶灰岩层厚一般为 1~5 cm,最大可达 20 cm,平均 4 cm;与上下的白云质灰岩层呈不规则的凹凸不平接触,遗迹扰动指数 BI 为 0~3. 褐黄色白云质灰岩层厚 0.3~2.0 cm,平均 0.8 cm,遗迹扰动指数较高,通常 BI 为 2~3. 潜穴常常从褐黄色白云质灰岩层向下掘穴进入灰白色微晶灰岩中,并在微晶灰岩中形成强烈扰动. 潜穴一般限制在一个韵律旋回中,很少穿越多个旋回.

成因解释:遗迹化石 *Palaeophycus heberti* 为悬食生物留下的居住潜穴,潜穴总是从界面处向下掘穴并被动充填为上覆沉积物,类似现代的多毛类动物;明显的厚衬壁说明造迹时底质松软,造迹生物需要不断分泌体液来加固潜穴,由隐晶质灰泥组成的衬壁也说明了这一点;潜穴填充物与衬壁之间以及潜穴与围岩之间的界限光滑无抓痕,说明潜穴为蠕虫类所建造;遗迹化石的丰度普遍较高,一般生物扰动指数 BI 为 2 或 3;同种潜穴个体大小差别很大,特别是保存有很多直径小于 1 mm 的潜穴,即便是个体如此小的潜穴竟然也发育有衬壁. 这些特征说明 *Palaeophycus heberti* 由机会种(*r*-选择)所建造. 机会生物表现出一种 *r*-策略,即强调迅速生长的速率(*r*). 短的生育周期是 *r*-策略中增加居群规模的一个最重要的机制. Gould(1977)曾经讨论过幼虫特征和生态学之间的关系,他的理论是 *r*-选择的幼虫特征与性早熟有关. 机会种的寿命短但性成熟较

早,较宽的环境适应能力和广泛的觅食习惯使得机会种能够迅速占领一个刚开放的或没有开发的生境(Pemberton et al., 2001). Ekdale(1985)把机会(*r*-选择)遗迹化石的特点总结为:(1)不受相控制,可以产生在比较宽的沉积环境里;(2)高度局限(在空间上分布很少,延续时间短),它们一旦发生,就非常丰富、密集堆积;(3)低分异度,岩石中的遗迹化石组合反映生活环境的恶化(如高度变化的盐度和温度、非常低的含氧水平或不可预测的移动基底). 在大多数情况下,机会的移居者是悬浮滤食或表面进食的多毛类(Pemberton et al., 2001).

发育 *Palaeophycus heberti* 遗迹组构的围岩为微晶灰岩与白云质灰岩薄互层,未见任何层理构造和生物碎屑、内碎屑颗粒,也未见任何暴露标志,但局部夹鲕粒灰岩薄层,微晶灰岩层与白云质灰岩层界面凹凸不平. 上述特征说明沉积物形成在低能的静水环境中,但周期性受到动荡水体的影响. 潜穴充填物中的亮晶方解石颗粒发育双晶条纹,是成岩作用晚期的产物,与沉积条件没有任何关系. 发育 *Palaeophycus heberti* 遗迹组构的层段上覆与下伏地层均为含 *Macaronichnus segregatis* 遗迹组构的台地浅滩相鲕粒灰岩,由此可见,该遗迹组构形成在局限台地潮下低能环境中,是由机会种所留下的低分异度高丰度机会遗迹组构.

3 遗迹组构和沉积环境演化

根据遗迹组构和沉积特征,洛阳龙门地区张夏组可划分为 2 个演化阶段(图 8).

第Ⅰ阶段位于张夏组底部,以发育无鲕粒滩的潮下碳酸盐岩台地为特征. 遗迹组构由缺乏垂向扰动并以发育少量简单水平潜穴的 *Planolites montanus* 遗迹组构逐渐向中等垂向扰动及高遗迹分异度的 *Palaeophycus tubularis-Thalassinoides horizontalis* 遗迹组构演化(图 8,底部第Ⅰ阶段),反映出造迹垂生物向掘穴能力及对表层沉积物混合能力的提高;沉积物以薄板状微晶灰岩夹极薄层页岩或泥岩为主,夹多层竹叶状砾屑灰岩,但不发育鲕粒灰岩;沉积环境由正常浪基面和风暴浪基面之间的潮下低能较深水碳酸盐岩台地逐渐过渡为正常浪基面附近的较高能浅水环境(图 9).

第Ⅱ阶段位于张夏组中上部,以发育鲕粒滩的碳酸盐岩台地为特征. 遗迹组构由滨岸浅滩发育的 *Skolithos linearis-Planolites montanus* 遗迹组构向

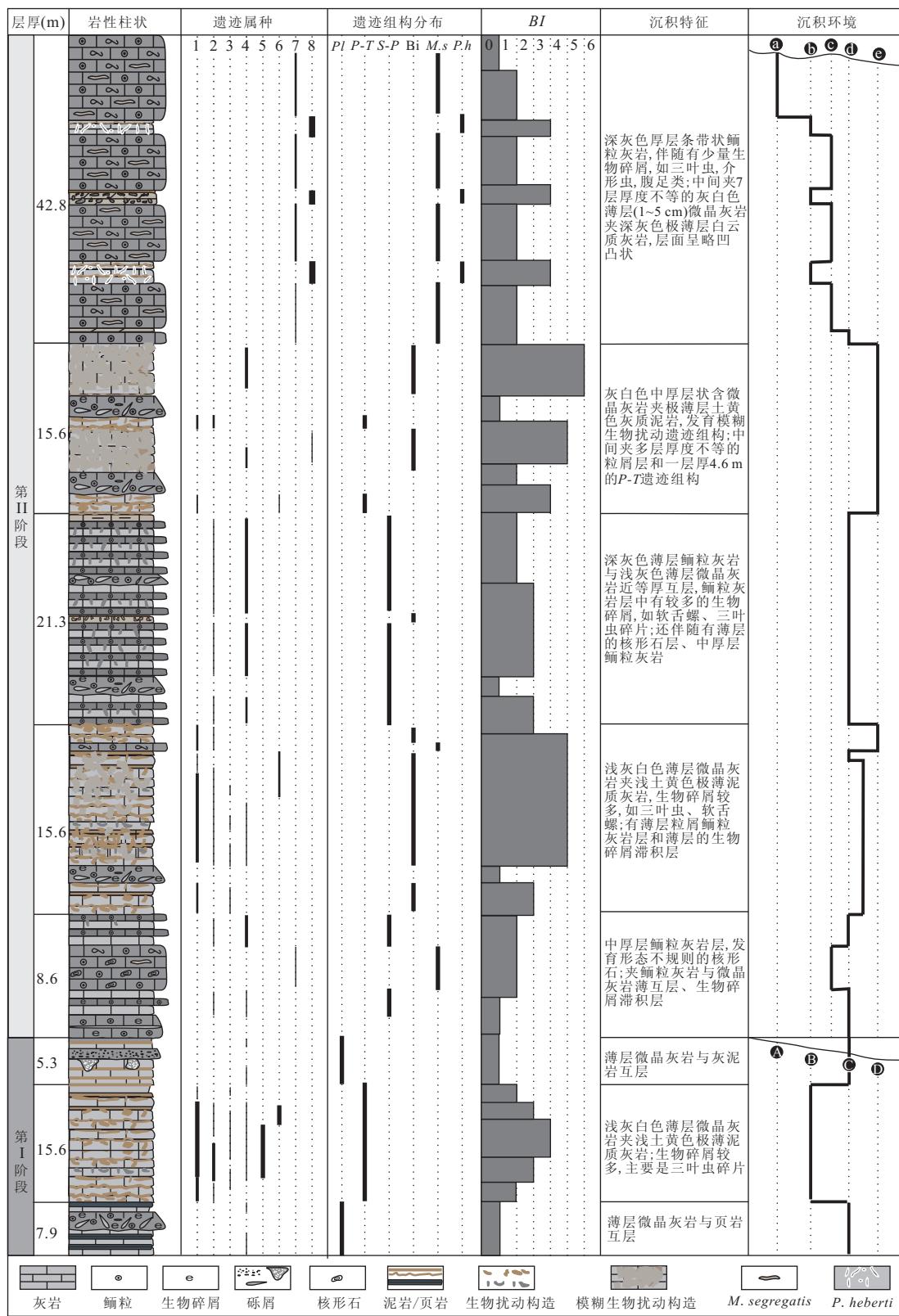


图 8 洛阳龙门地区中寒武统张夏组遗迹组构和沉积环境演化

Fig. 8 Detailed ichnofabrics and sedimentary environment of the Middle Cambrian Zhangxia Formation in Longmen area, Luoyang City

遗迹属种: 1. *Palaeophycus tubularis*; 2. *Skolithos linearis*; 3. *Arenicolites* isp.; 4. *Planolites montanus*; 5. *Thalassinoides bacae*; 6. *Thalassinoides horizontalis*; 7. *Macaronichnus segregatis*; 8. *Palaeophycus heberti*; 遗迹组构及生物扰动指数见前文描述。沉积环境: a. 滨岸浅滩; b. 局限台地; c. 台地浅滩; d. 浅滩台地; e. 开阔台地; A. 平均浪基面; B. 潮下带低能较深水区; C. 无镶边碳酸盐岩台地较浅水区; D. 平均风暴面

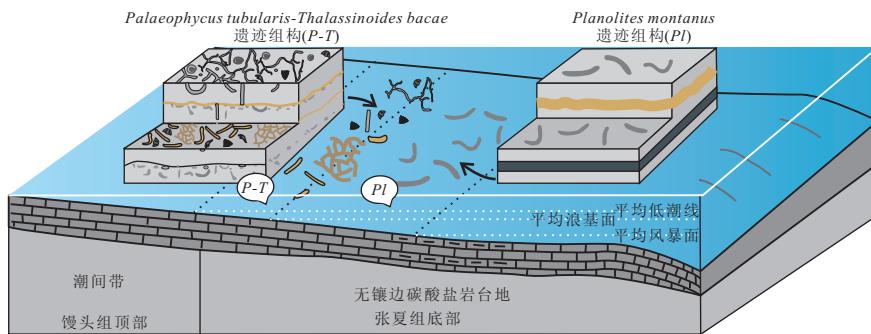


图9 洛阳龙门地区张夏组底部(I段)沉积环境和遗迹组构分布模式

Fig. 9 Distribution diagram of sedimentary environments and ichnofabrics in the bottom of the Zhangxia Formation (I section), Longmen area, Luoyang city

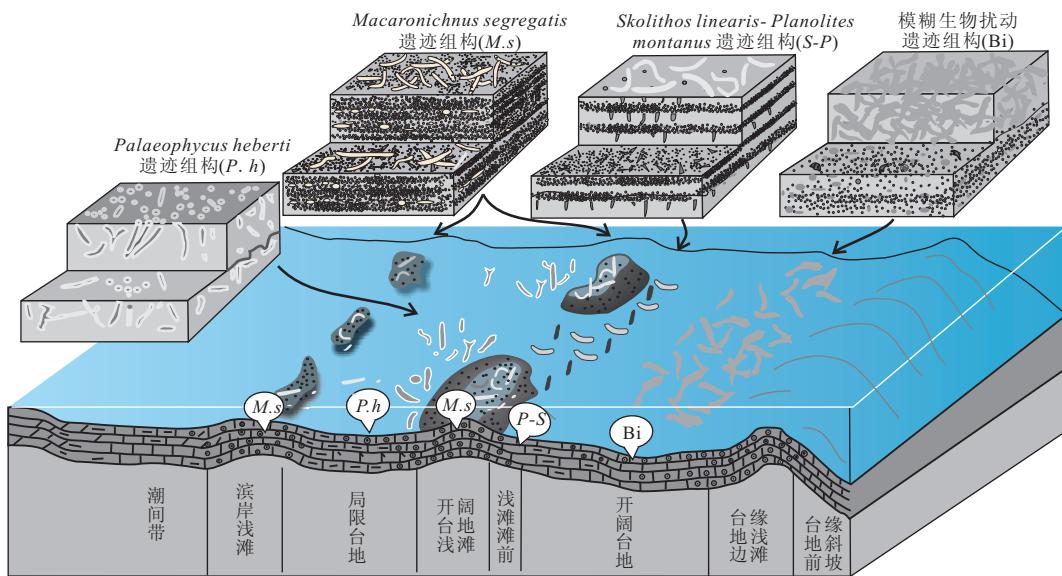


图10 洛阳龙门地区张夏组(第Ⅱ阶段)沉积环境和遗迹组构分布模式

Fig. 10 Distribution diagram of sedimentary environments and ichnofabrics in the Zhangxia Formation (II section), Longmen area, Luoyang city

开阔台地低能深水环境的模糊生物扰动遗迹组构演变,并随着台地鲕粒浅滩的阻隔和台地的分化,模糊生物扰动遗迹组构让位于鲕粒浅滩发育的 *Macaronichnus segregatis* 遗迹组构与滩后局限台地特有的 *Palaeophycus heberti* 遗迹组构(图10)。沉积物以一套厚层鲕粒灰岩、鲕粒灰岩与微晶灰岩薄互层、中厚层生物扰动灰岩等为主,而竹叶状砾屑灰岩不发育(图8,第Ⅱ阶段)。沉积环境从滨岸浅滩逐渐加深到深水低能开阔台地,然后变浅形成台地鲕粒滩及滩后局限台地。

4 讨论

众所周知,沉积环境控制生物分布,不同种类或

生活习性的生物分布在不同的区域,遗迹化石比实体化石更能精准地反映生物与沉积环境的关系(Taylor *et al.*, 2003)。研究区模糊生物扰动遗迹组构的 BI 通常为 3~4,甚至达到 5,扰动量很大,反映了其沉积底质松软、营养物质和氧含量丰富,水体动力不高,生物殖居窗长,遗迹化石分异度和丰度均较高,代表了寒武纪最适合浅梯阶造迹生物生存的低能深水碳酸盐台地环境,且沉积底质松软。*Palaeophycus tubularis-Thalassinoides horizontalis* 遗迹组构的遗迹化石形态多清晰可辨,但仍能发现较多的模糊生物扰动构造,说明表栖和内栖生物均可以在此处生活,遗迹化石分异度较高但丰度低到中等,代表寒武纪最适合中一浅梯阶造迹生物生存的低一中等能量浅水碳酸盐台地环境。由单一遗迹属种组

成的 *Macaronichnus segregatis* 遗迹组构反映沉积环境持续动荡, 只有内栖生物才能在此处生活并留下遗迹化石, 而表栖生物则很难在这种高能环境中生活, 遗迹化石分异度极低而丰度很高, 代表寒武纪仅适合中梯阶造迹生物生存的高能碳酸盐台地浅滩环境。

沉积环境中水体的能量对造迹生物的生活和遗迹化石的保存起重要作用。静水或低能环境条件利于造迹生物的生存, 遗迹化石多保存为水平或近水平潜穴, 如 *Planolites montanus* 遗迹组构和模糊生物扰动遗迹组构。高能动荡的环境中以垂直或高角度倾斜分布的潜穴为主(Wang et al., 2010), 但本研究区高能鲕粒滩中的 *Macaronichnus segregatis* 多呈水平分布, 这似乎与常理相悖。其实 *M. segregatis* 并不是保存在高能环境中的悬食居住潜穴, 而是层内进食潜穴。与豫西寒武纪 *Macaronichnus segregatis* 相似的现代潜穴的造迹生物多毛类 *Euzonus* 仅生活在高能海岸沙滩表层砂波以下 80 cm 的沉积物中(Clifton and Thompson, 1978), 由于水动力对其影响很小, 因而以水平潜穴的形式保存下来, 由此可推测寒武纪此类造迹生物同样生活在此类沉积环境中。由此可见, 一般情况下, 高能动荡环境可通过垂直或高角度倾斜潜穴的密集分布表现出来, 但在特定条件下也可由水平潜穴来表示。

5 结论

洛阳龙门地区出露一套完好且连续的张夏组生物扰动薄层微晶灰岩和厚层条带状鲕粒灰岩, 从中识别出 6 个遗迹组构: *Planolites montanus* 遗迹组构以缺乏垂向生物扰动、仅发育少量严格水平分布的简单遗迹化石为特征, 保存在薄板状微晶灰岩与泥岩或泥灰岩薄互层夹竹叶状砾屑灰岩沉积中; *Palaeophycus tubularis-Thalassinoides horizontalis* 遗迹组构以高遗迹分异度、生物扰动强度中等为特点, 形成于鲕粒滩不发育、与广海连通性较好并时常受到风暴流影响的浅水碳酸盐岩台地区; 酾粒灰岩和微晶灰岩薄互层中的 *Skolithos linearis-Planolites montanus* 遗迹组构代表高、低能交替的滨岸浅滩或开阔台地滩间坪或滩前环境; 模糊生物扰动遗迹组构发育在风暴浪基面附近、偶尔被远源风暴干扰的深水开阔台地沉积中; 厚层鲕粒灰岩中的 *Macaronichnus segregatis* 遗迹组构形成在滨岸浅滩或台地鲕粒滩高能动荡环境中, 为近岸海相高能

环境特有的遗迹化石; *Palaeophycus heberti* 遗迹组构形成在局限台地潮下低能环境中, 为机会种所留下的低分异度、高丰度机会遗迹组构。

龙门地区张夏组的沉积环境演化分为 2 个阶段: 第Ⅰ阶段是鲕粒滩不发育阶段, 沉积环境位于平均浪基面与平均风暴面之间的无镶边碳酸盐岩台地相; 第Ⅱ阶段是鲕粒滩发育阶段和发育后阶段, 沉积环境从鲕粒滩到滩前、开阔台地(向海方向, 水体加深)、然后又到滩前、鲕粒滩、局限台地、最后到滨岸浅滩(向陆方向, 水体变浅)。

致谢: 参加野外工作的还有河南理工大学的硕士研究生张盼盼和杨小伟, 在此一并表示感谢。

References

- Bromley, R. G. , Ekdale, A. A. , 1986. Composite ichnofabrics and tiering of borrows. *Geological Magazine*, 123(1): 59—65. doi: 10.1017/S0016756800026534
- Chen, J. Q. , Shi, X. Y. , Zhang, G. R. , et al. , 1998. High-frequency sequence-stratigraphy of the Upper Changhia Formation in the North China platform. *Journal of Stratigraphy*, 22(2): 109—115 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. T. , Han, Z. Z. , Zhang, X. L. , et al. , 2009. Early diagenetic deformation structures of the Furongian ribbon rocks in Shandong Province, China; a new perspective of the genesis of limestone conglomerates. *Sci. in China (Ser. D)*, 39(12): 1732—1743 (in Chinese). doi: 10.1007/s11430-010-0010-6
- Clifton, H. E. , Thompson, J. K. , 1978. *Macaronichnus segregatis*: a feeding structure of shallow marine polychaetes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48(4): 1293—1302. doi: 10.1306/212F7667-2B24-11D7-8648000102C1865D
- Ekdale, A. A. , 1985. Paleoecology of the marine endobenthos. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 50(1): 63—81. doi: 10.1016/S0031-0182(85)80006-7
- Ekdale, A. A. , Bromley, R. G. , 1983. Trace fossils and ichnofabric in the Kjølby Gaard Marl, Uppermost Cretaceous, Denmark. *Bulletin of Geology Society of Denmark*, 31: 107—119.
- Gingras, M. K. , MacMillan, B. , Balcom, B. J. , et al. , 2002. Using magnetic resonance imaging and petrographic techniques to understand the textural attributes and porosity distribution in *Macaronichnus*-burrowed sandstone. *Journal of Sedimentary Research*, 72(4): 552—558. doi: 10.1306/122901720552

- Gould, S. J., 1977. Ontogeny and phylogeny. Harvard University Press, Cambridge.
- Jiang, M. S., Sha, Q. A., 1996. Algal limestones and their sedimentary facies in the Zhangxian Formation (Middle Cambrian), North Jiangsu-West Shandong region. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 16(5): 12—17 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. S., Liu, S. C., You, W. D., 1987. The Middle Cambrian Zhangxian Formation in Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 11(3): 200—206 (in Chinese).
- Lv, Z. W., Zhang, N., Xia, W. C., 2009. Types and composition of carbonate microfacies and analysis on sedimentary facies of Middle Cambrian Zhangxian Formation in Changqing, Shandong Province. *Geological Science and Technology Information*, 28(5): 47—52 (in Chinese with English abstract).
- Mei, M. X., Ma, Y. S., Mei, S. L., et al., 1997. Framework of Cambrian sedimentary sequence and evolution of carbonate platform in North China. *Geoscience*, 11(3): 275—282 (in Chinese with English abstract).
- Mei, M. X., Mei, S. L., 1997. Cyclic sequences of composite sea-level change developed in Zhangxian Formation of Middle-Cambrian in North-China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(4): 5—10 (in Chinese with English abstract).
- Miller, M. F., Smail, S. E., 1997. A semiquantitative field method for evaluating bioturbation on bedding planes. *Palaios*, 12(4): 391—396. doi: 10.2307/3515338
- Pemberton, S. G., Spila, M., Pulham, A. J., et al., 2003. Ichnology and sedimentology of shallow marine to marginal systems: Ben Nevis & Avalon reservoirs, Jeanne d' Arc basin. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 51(2): 206—208. doi: 10.2113/51.2.206
- Pemberton, S. G., Zhou, Z. C., MacEachern, J., 2001. Modern ecological interpretation of opportunistic (*r*-selected) and equilibrium (*K*-selected) trace fossils. *Acta Palaeontologica Sinica*, 40(1): 134—142 (in Chinese with English abstract).
- Savrda, C. E., 2007. Taphonomy of trace fossils. In: Willian, M. III, ed., Trace fossils: concepts, problems, prospects. Geology Department Humboldt State University Arcata, CA, USA, 92—109.
- Seike, K., 2007. Palaeoenvironmental and palaeogeographical implication of modern *Macaronichnus segregates*-like traces in foreshore sediments on the Pacific coast of central Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252(3—4): 497—502. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.05.005
- Seike, K., 2008. Burrowing behaviour inferred from feeding traces of the opheliid polychaete *Euzonus* sp. as response to beach morphodynamics. *Mar. Biol.*, 153(6): 1199—1206. doi: 10.1007/s00227-007-0893-8
- Seike, K., 2009. Influence of beach morphodynamics on the distributions of the opheliid polychaete *Euzonus* sp. and its feeding burrows on a sandy beach: paleoecological and paleoenvironmental implications for the trace fossil *Macaronichnus Segregatus*. *Palaios*, 24(12): 799—808. doi: 10.2110/palo.2009.p09-007r
- Su, D. C., Li, Q. M., Luo, G. W., et al., 1995. Method for drawing fischer plots and its applications on studying cyclic sequences: example from Middle Cambrian Zhangxian Formation, western Hills of Beijing. *Geoscience*, 9(3): 279—283 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, A. M., Goldring, R., 1993. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric. *Journal of the Geological Society*, 150(1): 141—148. doi: 10.1144/gsjgs.150.1.0141
- Taylor, A. Goldring, R., Gowland, S., 2003, Analysis and application of ichnofabrics. *Earth-Science Reviews*, 60(3—4): 227—259. doi: 10.1054/bjoc.2001.2125
- Wang, M., Qi, Y. A., Yang, W. T., 2010. Ichnology and sedimentology of fluvial deposits in the Middle Triassic Youfangzhuang Formation, Henan Province, North China. *Journal of Science*, 21(Suppl. 1): 213—215. doi: 10.1007/s12583-010-0214-x
- Wignall, P. B., Twitchett, R. J., 1999. Unusual intraclastic limestones in Lower Triassic carbonates and their bearing on the aftermath of the End-Permian mass extinction. *Sedimentology*, 46(2): 303—316. doi: 10.1046/j.1365—3091.1999.00214.x
- Xie, D. N., He, M. X., Zhou, L. F., et al., 2006. Characteristics of overthrust structures on northern edge of east Qinling-Dabie orogenic belt and hydrocarbon potentials. *Oil & Gas Geology*, 27(1): 48—55 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, J. L., Li, Y., Mu, X. N., et al., 2000. Biostratigraphy of trilobites from Changchia stage (Late Middle Cambrian) in Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 24(2): 136—143 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. R., Wang, G. Z., Qu, H. X., et al., 1997. High-frequency cyclic sequences and composite sea-level change in the upper member of the Zhangxian Formation in Fuzhou, Liaoning Province. *Regional Geology of China*, 16(3): 321—328 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X., Zhang, N., Yang, Z. H., et al., 2009. Carbonate microfacies and sedimentary facies of Middle Cambrian For-

- mation at Xiaweidiing profile in western Hills, Beijing, China. *Geological Science and Technology Information*, 28(6):25—30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. T., 1963. A classification of the Lower and Middle Cambrian trilobites from North and northeastern China, with description of new families and new genera. *Acta Palaeontologica Sinica*, 11(4):447—487 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈建强,史晓颖,张国仁,等,1998.华北地台中寒武统张夏组上部高频层序研究.地层学杂志,22(2):109—115.
- 陈吉涛,韩作振,张晓蕾,等,2009.鲁西芙蓉统条带灰岩早期成岩变形构造——竹叶状砾屑灰岩形成机理探讨.中国科学(D辑),39(12):1732—1743.
- 江茂生,沙庆安,1996.苏鲁地区中寒武统张夏组藻灰岩及沉积相.岩相古地理,16(5):12—17.
- 刘怀书,刘书才,游文澄,1987.山东中寒武统张夏组.地层学杂志,11(3):200—206.
- 吕钊炜,张宁,夏文臣,2009.山东省长清县中寒武统张夏组的微相组分、微相类型及沉积相分析.地质科技情报,28(5):47—52.
- 梅冥相,马永生,梅仕龙,等,1997.华北寒武系层序地层格架及碳酸盐台地演化.现代地质,11(3):275—282.
- 梅冥相,梅仕龙,1997.华北中寒武世张夏组复合海平面变化旋回层序.沉积学报,15(4):5—10.
- Pemberton, S. G., 周志澄, MacEachern, J., 2001. 机会(r -选择)和均衡(k -选择)遗迹化石的现代生态学解释.古生物学报,40(1):134—142.
- 苏德辰,李庆谋,罗光文,等,1995. Fischer图解及其在旋回层序研究中的应用——以北京西山张夏组为例.现代地质,9(3):279—283.
- 解东宁,何明喜,周立发,等,2006.东秦岭一大别造山带北缘逆冲推覆构造特征及油气前景.石油与天然气地质,27(1):48—55.
- 袁金良,李越,穆西南,等,2000.山东张夏期(中寒武世晚期)三叶虫生物地层.地层学杂质,24(2):136—143.
- 张国仁,王国祯,曲洪祥,等,1997.辽宁省复州西南部张夏组上段高频率旋回地层及复合海平面变化.中国区域地质,16(3):321—328.
- 张旭,张宁,杨振鸿,等,2009.北京西山下苇甸中寒武统碳酸盐岩微相及沉积相研究.地质科技情报,28(6):25—30.
- 张文堂,1963.华北及东北南部早及中寒武世三叶虫的分类及新属,新科的记述.古生物学报,11(4):447—487.