

doi: 10.12029/gc20180212

荆锡贵, 李凤杰, 成晓雨, 杨晓琪, 张昊, 沈凡. 2018. 四川龙门山地区早—中泥盆世混积相遗迹化石及其环境分析[J]. 中国地质, 45(2): 377–391.
Jing Xigui, Li Fengjie, Cheng Xiaoyu, Yang Xiaoqi, Zhang Hao, Shen Fan. 2018. Trace fossils of hybrid facies from Early-Middle Devonian strata in Longmenshan area, Sichuan Province[J]. Geology in China, 45(2): 377–391(in Chinese with English abstract).

四川龙门山地区早—中泥盆世混积相遗迹化石及其环境分析

荆锡贵¹ 李凤杰¹ 成晓雨¹ 杨晓琪² 张昊¹ 沈凡¹

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 新疆煤制天然气外输管道有限责任公司, 北京 100728)

摘要: 龙门山地区早—中泥盆世碳酸盐岩和碎屑岩组成的混合沉积相富含大量海相遗迹化石, 可识别居住迹、进食迹、觅食迹、爬行迹和停息迹 5 大类 14 属, 包括居住迹: *Skolithos*; 进食迹: *Chondrites*、*Phycodes*、*Planolites*、*Rhizocorallium*、*Thalassinoides* 和 *Zoophycos*; 觅食迹: *Cylindrichnus* 以及 *Palaeophycus*; 爬行迹: *Cruziana* 和 *Monomorphichnus*; 停息迹: *Asterichnus*、*Lockeia* 和 *Rusophycus* 等, 这些遗迹化石分属于 4 个遗迹化石组合, 反映了不同沉积环境, 分别为: (1) *Skolithos*—*Thalassinoides* 遗迹组合, 沉积于高能砂质环境中, 为水动力较强的无障壁滨岸前滨; (2) *Rusophycus*—*Phycodes* 遗迹化石组合反映了水动力较弱的近滨环境; (3) *Chondrites*—*Palaeophycus* 遗迹化石组合反映了贫氧、水动力条件较弱的近滨下部环境; (4) *Zoophycos*—*Palaeophycus* 遗迹化石组合反映的环境为正常浪基面以下, 风暴浪基面以上的风暴沉积环境, 据此建立了龙门山地区早—中泥盆世混积相遗迹化石生活环境分布模式。龙门山地区早—中泥盆世发现的 3 种类型 *Zoophycos* 遗迹化石, 与腕足介壳富集层、波痕、丘状和洼状交错层理等反映浅水环境的沉积特征共存, 表明泥盆纪 *Zoophycos* 形成于浅水环境。

关键词: 遗迹化石; 古环境; 混积相; 泥盆纪; 龙门山地区

中图分类号: P534.44; Q911.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)02-0377-15

Trace fossils of hybrid facies from Early–Middle Devonian strata in Longmenshan area, Sichuan Province

JING Xigui¹, LI Fengjie¹, CHENG Xiaoyu¹, YANG Xiaoqi², ZHANG Hao¹, SHEN Fan¹

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. SINOPEC Xinjiang Coal Natural Gas Transmission Pipeline Co., Ltd., Beijing, 100728, China)

Abstract: Abundant marine trace fossils are preserved in the Early–Middle Devonian strata of the Guixi–Shawozi section in Longmenshan area, Sichuan Province. According to the shapes, three types of trace fossils were identified that include *Domichnia* as

收稿日期: 2016-11-17; 改回日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目“龙门山地区泥盆纪土桥子组高频韵律旋回成因及古气候意义研究”(41172100)和四川省教育厅自然科学重点项目“龙门山地区泥盆纪风暴沉积及其地质意义”(12ZA012)联合资助。

作者简介: 荆锡贵, 男, 1992年生, 硕士生, 沉积学专业; E-mail: 631407785@qq.com。

通讯作者: 李凤杰, 男, 1972年生, 教授, 沉积学专业, 主要从事沉积学与层序地层学方面的教学与研究工作; E-mail: lifengjie72@163.com。

Skolithos, Fodinichnia as Chondrites, Phycodes, Planolites, Rhizocorallium, Thalassinoides and Zoophycos; Food-seeking traces including Cylindrichnus and Palaeophycus; Repichnia as Cruziana and Monomorphichnus; Cubichnia as Asterichnus, Lockeia and Rusophycus. 14 kinds in total trace fossils can be identified clearly. The ichnocoenoses represent types of Domichnia, Fodinichnia, Food-seeking traces, Repichnia and Cubichnia. Four ichnocoenoses representing different sedimentary environments were recognized as follows: (1) Skolithos-Thalassinoides ichnocoenosis can be explained as Domichnia from higher-energy foreshore; (2) Rusophycus-Phycodes ichnocoenosis mainly consists of Cubichnia and Fodinichnia generated in higher-energy nearshore; (3) Chondrites-Palaeophycus ichnocoenosis is from shallow shelf, which suggests sub-oxic and lower energy; (4) Zoophycus-Palaeophycus ichnocoenosis is considered as Fodinichnia from higher-energy shallow shelf between normal wave base to storm wave base. In terms of the ichnocoenoses, living environment and distribution pattern of trace fossils of hybrid facies were set up from Early-Middle Devonian strata in Longmen-shan area. Three kinds of Zoophycos fossils were observed, which were coexistent with concentrations of brachiopoda and shell, ripple marks, hummocky and swaley cross bedding, which reflects shallow environment sedimentary characteristics from Early to Middle Devonian in Longmenshan area and indicates that Zoophycos fossils were formed in a shallow environment.

Key words: trace fossil; paleoenvironment; hybrid facies; Devonian; Longmenshan area

About the first author: JING Xigui, male, born in 1992, master candidate, majors in sedimentology; E-mail: 631407785@qq.com.

About the corresponding author: LI Fengjie, male, born in 1972, professor, mainly engages in the teaching and study of sedimentology and sequence stratigraphy; E-mail: lifengjie72@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation Project for Research on Genesis of High Frequency Rhythm Cycle and Significance of Palaeoclimate in Devonian Tuqiaozi Formation, Longmenshan Area (No. 41172100) and Natural Science Key Project of Education Department of Sichuan of China for Geological Significance and Storm Deposit from Devonian in Longmenshan Area (No. 12ZA012).

1 引 言

龙门山地区泥盆纪北川桂溪—沙窝子剖面(简称甘溪剖面)(图1),是中国泥盆系重要的典型剖面之一(侯鸿飞,1988;鲜思远,1995)。研究始于20世纪20年代末,众多地质学家在长达近一个世纪的研究中,对剖面的地层、沉积和古生物等方面取得了丰硕成果(侯鸿飞,1988;鲜思远,1995;刘文均等,1996;高联达,1997;程红光等,2008;魏钦廉等,2011;李凤杰等,2015,2016;Li et al.,2016)。该剖面保存完整,中一下泥盆统为碎屑岩和碳酸盐岩组成的混合沉积相(李祥辉等,1996)。该剖面地层连续、露头良好,在混合沉积的地层中遗迹化石丰富、类型多样。针对龙门山泥盆系遗迹化石,前人也有研究和讨论,但主要集中在下泥盆统的平驿铺组(林文球等,1986;张立军等,2013),杨式溥等(2004)对下泥盆统平驿铺组至中泥盆统下部的金宝石组遗迹化石进行了识别与环境分析,划分了*Skolithos*、*Cruziana*和*Zoophycos*共3种遗迹相类型。近来,随着对该剖面详细观察与测量,在早一中泥盆世获得了更为丰富遗迹化石资料。如在甘

溪村南部约4 km的鹰嘴岩剖面玉龙村公路旁出露的平驿铺组砂岩底部保存极为难得的清晰、丰富的遗迹化石组合,化石类型可达近10余之多,这为研究遗迹相的研究提供了详实的资料(图2a、b);其次,在早泥盆世的白柳坪组和中泥盆世的养马坝组保存大量的*Zoophycos*遗迹化石,这些遗迹化石常与介壳富集层(图2c)、波痕(图2d)、丘状交错层理(图2e、f)等反映浅水环境的沉积构造相共生,这与Seilacher(1967)划分的*Zoophycos*遗迹相代表斜坡相之间存在明显差别;再者,在中泥盆世观雾山组下部发现数量极其罕见的*Skolithos*富集层(图2g、h)。这些遗迹化石的发现,不但是对该区遗迹化石研究是有益的补充,也为该区沉积相的研究提供了重要相标志。

2 地层与沉积背景

四川龙门山甘溪剖面地层连续、露头良好,化石丰富、沉积类型多样,泥盆系地层厚度巨大(图3),沉积相类型多样,包括碎屑岩、碳酸盐岩和混积岩等多种岩石类型(陈源仁等,1996;李祥辉等,1996;刘文均等,1999)。下泥盆统由平驿铺组、白

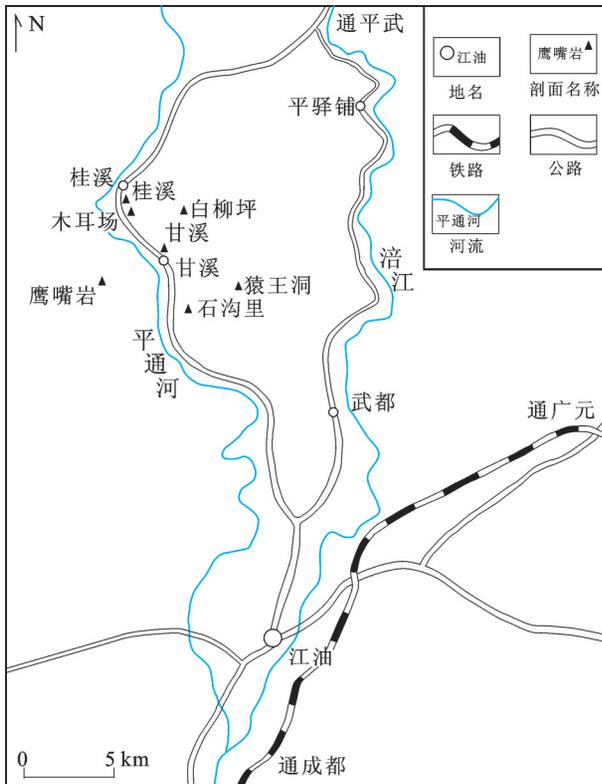


图1 龙门山甘溪剖面地理位置图

Fig. 1 Locality of the Ganxi section in Longmenshan area, Sichuan Province

柳坪组、甘溪组、谢家湾组和养马坝组二台子段组成,是一套以碎屑岩为主并逐渐向碳酸盐岩增加的地层。其中,平驿铺组—谢家湾组中部主要为三角洲、滨岸、碎屑岩陆棚和混积陆棚沉积(陈源仁等,1996;李祥辉等,1996),谢家湾组上部—养马坝组碳酸盐岩礁滩、混积陆棚沉积为主。中泥盆统主要含养马坝组养马坝段、金宝石组和观雾山组,发育碎屑岩和碳酸盐岩组成的混合沉积,由滨岸沉积、混积陆棚和碳酸盐岩缓坡相组成(李祥辉等,1996)。

3 遗迹化石保存类型及其种类

3.1 遗迹化石保存类型

龙门山地区早一中泥盆世遗迹化石按照造迹生物行为习性划分,可以分为5大类,共14种,即居住类 *Skolithos* 等;进食迹如 *Chondrites*、*Cylindrichnus*、*Thalassinoides*、*Planolites*、*Rhizocorallium* 和 *Zoophycos* 等;觅食迹如 *Phycodes* 和 *Palaeophycus* 等;爬行迹如 *Cruziana* 和

Monomorphichnus 停息迹如 *Asterichnus*、*Lockeia*、*Rusophycus* 等。按照 *Seilacher* 的遗迹化石保存方式分类划分(*Seilacher*, 1967; 杨式溥, 2004), 其保存方式多为半浮雕保存, 全浮雕保存较少。

3.2 遗迹化石种类

3.2.1 星状迹属 *Asterichnus* Bandel, 1967

劳伦斯星状迹 *Asterichnus lawrencensis* Bandel, 1967

保存于泥质粉砂岩,整体呈近圆形或椭圆形的星状放射迹,中心有空白区;遗迹由10条左右的放射脊组成,放射脊有分枝。遗迹整体直径为0.8~1.0 cm,单条放射脊长度在0.4~0.5 cm,其直径在1 mm左右;遗迹保存方式为半浮雕(图4a)。

本次发现的星状迹较杨式溥(2004)对该种遗迹化石的介绍偏小,但描述的化石特征与 *Asterichnus lawrencensis* (Bandel, 1967)模式种特征基本一致。该遗迹与 *Chondrites* isp.(图4a)共生,表明该种造迹生物生活环境与 *Chondrites* 遗迹种环境一致,为浅水陆棚相的贫氧地区。

产出层位:白柳坪组B29层。

3.2.2 丛藻迹 *Chondrites* von Sternberg, 1833

(1)丛藻迹未定种 *Chondrites* isp.

保存于灰色粉砂岩中,分枝少且不密集,主枝短粗;为分枝细少的潜穴系统。遗迹化石的保存类型为半浮雕保存,在发现的 *Chondrites* isp.中分叉为两次,其直径在1.0~1.2 mm,主枝直径约为2.3 mm(图4a)。

该遗迹最大的特点为主枝短粗,分枝少,整体呈羽毛状;本次发现的丛藻迹未定种保存在粉砂岩中,且与 *Lockeia siliquaria* 共生,表明其沉积环境为浅水陆棚环境。

产出层位:白柳坪组B29层。

(2)分乡丛藻迹比较种 *Chondrites* cf. *fexiangensis* Yang, 1984

Chondrites cf. *fexiangensis* 可见于龙门山早泥盆世的泥质粉砂岩中,保存类型为半浮雕,有分枝。整体呈簇状,末端呈树枝状,其分枝粗细较为一致;其潜穴系统较为复杂,分枝直径在1.9~2.3 mm,整体长约12 cm(图4b)。

该遗迹种为杨式溥(1984)最早发现并命名的。本次发现 *Chondrites* 与 *Palaeophycus* 共生,保



图2 龙门山地区早—中泥盆世遗迹化石野外照片

a—遗迹化石富集层, B29层, 白柳坪组, 鹰嘴岩剖面; b—遗迹化石富集层, B29层, 白柳坪组, 鹰嘴岩剖面; c—*Zoophycos* 与腕足介壳富集层共生, B39层, 白柳坪组, 鹰嘴岩剖面; d—*Zoophycos* 与波痕构造共生, B39层, 白柳坪组, 甘溪剖面; e—富含 *Zoophycos* 的风暴沉积, 发育冲刷面和丘状交错层理, B91层, 养马坝组, 石沟里剖面; f—*Zoophycos* 富集层, e中 Z1 的放大图; g—*Skolithos* 富集层横断面, 剖面图, B115层, 观雾山组, 猿王洞剖面; h—*Skolithos* 富集层横断面, 平面图, B115层, 观雾山组, 猿王洞剖面。Z—*Zoophycos*; H—*Howellella*; P—*Palaeophycus*; RM—波痕(Ripple marks); HCS—丘状交错层理(Hummocky cross-stratification); SCS—洼状交错层理(Swaley cross-stratification); ES—侵蚀面(Erosion surface)

Fig. 2 Field photographs of trace fossils from Early-Middle Devonian strata in Longmenshan area

a—Trace fossil concentration, B29 Bed, Bailiuping Formation, Yingzuiyan profile; b—Trace fossil concentration, B29 Bed, Bailiuping Formation, Yingzuiyan profile; c—*Zoophycos* coexistent with brachiopoda and shell concentration, B39 Bed, Bailiuping Formation, Yingzuiyan Profile; d—*Zoophycos* coexistent with wave ripple, B39 Bed, Bailiuping Formation, Ganxi profile; e—Enrich *Zoophycos* fossils in storm deposit, with erosion surface, Hummocky cross-stratification and Swaley cross-stratification, B91 Bed, Yangmaba Formation, Shigouli profile; f—Details of Z1 in e, *Zoophycos* concentration; g—Cross-sectional picture of *Skolithos* concentration, section, B115 Bed, Guanwushan Formation, Yuanwangdong profile; h—*Skolithos* concentration, plan, B115 Bed, Guanwushan Formation, Yuanwangdong profile. Z—*Zoophycos*; H—*Howellella*; P—*Palaeophycus*; WR—Ripple marks; HCS—Hummocky cross-stratification; SCS—Swaley cross-stratification; ES—Erosion surface

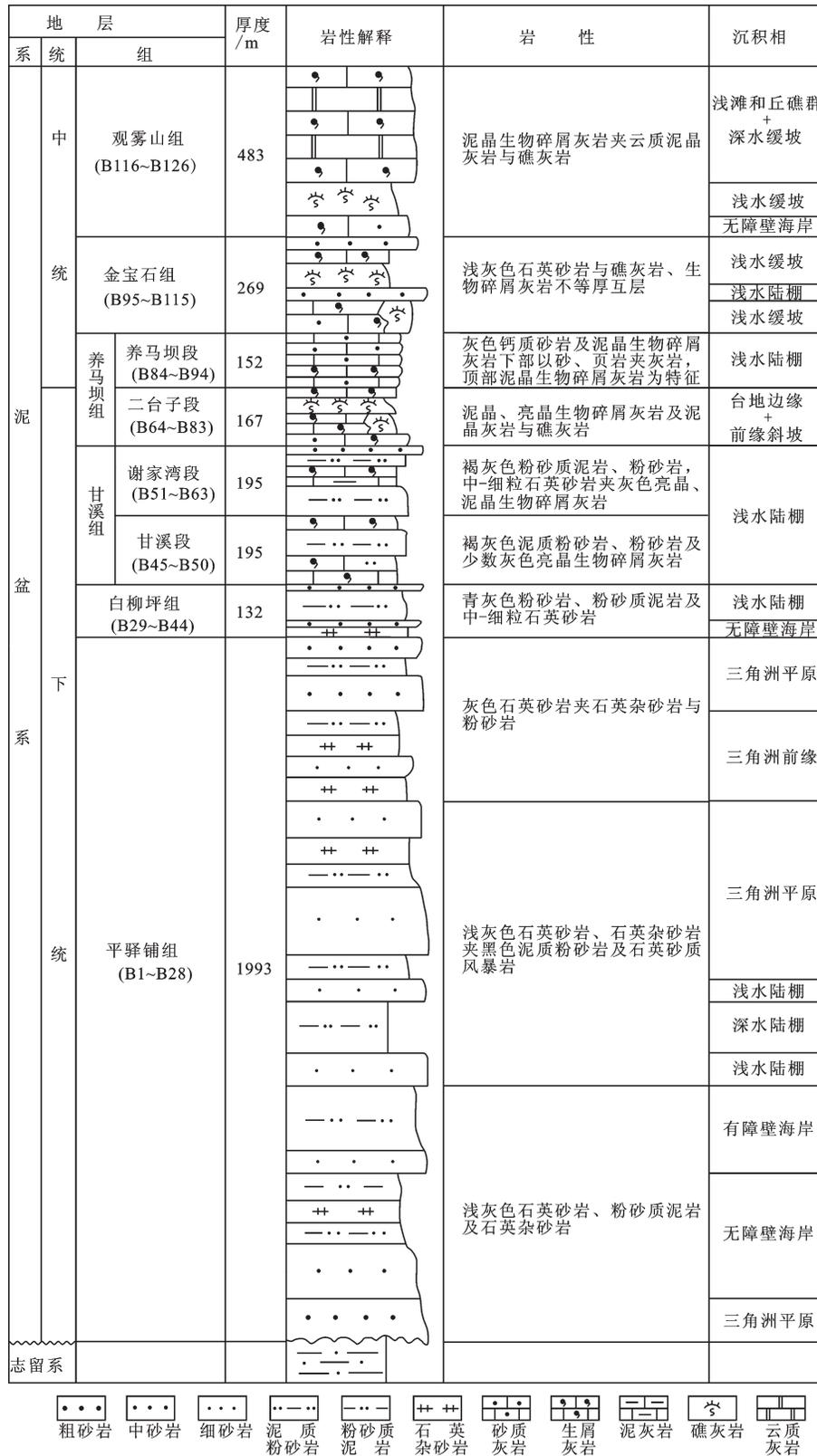


图3 龙门山地区早—中泥盆世沉积特征示意图 (据侯鸿飞等, 1988; 刘文均等, 1996; 陈源仁等, 1996 修改)
 Fig.3 Sedimentary characteristics of the Early–Middle Devonian strata in the Ganxi section, Longmenshan area (after Hou Hongfei et al., 1988; Liu Wenjun et al., 1996; Chen Yuanren et al., 1996)



图4 龙门山地区早—中泥盆世混积相遗迹化石类型野外照片

a—遗迹化石 *Asterichnus* 与 *Chondrites* 的组合, 为白柳坪组, B29层, 鹰嘴岩剖面; b—*Chondrites* cf. *fenxiangensis*, 谢家湾组, B67层, 甘溪剖面; c—*Chondrites targonii* 平驿铺组, B12层, 木耳厂剖面; d—*Chondrites* Type-C, 白柳坪组, B29层, 鹰嘴岩剖面; e—*Chondrites* cf. Type-C, 白柳坪组, B29层, 鹰嘴岩剖面; f—遗迹化石 *Cruziana liujingensis* 与 *Planolites beverleyensis* 组合, 平驿铺组, B10层, 木耳厂剖面; g—*Cruziana rouaulti*, 白柳坪组, B29层, 鹰嘴岩剖面; h—*Planolites beverleyensis*, 白柳坪组, B29层, 鹰嘴岩剖面; i—*Cylindrichnus concentricus*, 甘溪组, B44层, 白柳坪剖面; j—*Lockeia siliquaria*, 白柳坪组, B29层, 鹰嘴岩剖面。其中 A—*Asterichnus*; Ch—*Chondrites* isp.; Cr—*Cruziana liujingensis*; Pl—*Planolites beverleyensis*

Fig.4 Field photographs of trace fossils of hybrid facies from Early-Middle Devonian strata in Longmenshan area

a—*Asterichnus* coexistent with *Chondrites*, Bailiuping Formation, B29 Bed, Yingzuiyan profile; b—*Chondrites* cf. *fenxiangensis*, Xiejiawan Formation, B67 Bed, Ganxi profile; c—*Chondrites targonii*, Pingyipu Formation, B12 Bed, Muerchang profile; d—*Chondrites* Type-C, Bailiuping Formation, B29 Bed, Yingzuiyan profile; e—*Chondrites* cf. Type-C, Bailiuping Formation, B29 Bed, Yingzuiyan profile; f—*Cruziana liujingensis* coexistent with *Planolites beverleyensis*, Pingyipu Formation, B10 Bed, Muerchang profile; g—*Cruziana rouaulti*, Bailiuping Formation, B29 Bed, Yingzuiyan profile; h—*Planolites beverleyensis*, Bailiuping Formation, B29 Bed, Yingzuiyan profile; i—*Cylindrichnus concentricus*, Ganxi Formation, B44 Bed, Bailiuping profile; j—*Lockeia siliquaria*, Bailiuping Formation, B29 Bed, Yingzuiyan profile. A, Ch, Cr and Pl represent *Asterichnus*, *Chondrites*, *Cruziana* and *Planolites*, respectively

存于谢家湾组,夹在两层风暴岩间的泥质沉积中,其位置应在正常浪基面以下,风暴浪基面以上的浅水陆棚地区。

产出层位:谢家湾组 B67 层。

(3) 塔尔刚丛藻迹 *Chondrites targonii* Brongniart, 1828

保存于灰色粉砂岩中,该种遗迹整体在平面上呈丛状展开,分枝简单且较为密集,同种遗迹间较为分散。该种遗迹有分枝,分枝为二分和三分,分枝呈锐角,为 30~40°。遗迹长约 2.5 cm,分枝直径为 1.5~2.0 mm,保存方式为半浮雕保存(图 4c)。

Chondrites targonii 和 *Chondrites intricatus* (Brongniart, 1823) 在平面上形态较为相似,两者呈丛状分布,分枝密集,且有多次分枝。分枝间夹角均为锐角且较小,且分布稀疏。两者最大的区别在于 *Chondrites targonii* 在分枝上比 *Chondrites intricatus* 稀疏,分枝直径较 *Chondrites intricatus* 直径大,分枝间角度较 *Chondrites intricatus* 分枝角度大。该种遗迹化石与 *Phycodes palmatus* 共生,证明其沉积环境为浅水陆棚。

产出层位:平驿铺组 B12 层。

(4) C 型丛藻迹 *Chondrites* Type-C Osgood, 1970

保存于灰色细砂岩中,遗迹化石平行于层面,整体呈菊花状或簇状展布的潜穴。具多次分枝,分枝密集且交织呈网状,分枝为二分或三分。遗迹化石整体直径在 6.5~7.0 cm,分枝直径为 0.7~1.2 mm。遗迹化石为半浮雕保存(图 4d)。

本次发现的 *Chondrites* Type-C 与 *Lockeia*、*Palaeophycos* 和 *Cruziana* 共生,且 *Chondrites* Type-C 也有发现。这些遗迹化石共生在同一层,反映的沉积环境为浅水陆棚环境。

产出层位:白柳坪组 B29 层。

(5) C 型丛藻迹比较种 *Chondrites* cf. Type-C Osgood, 1970

该遗迹化石于层面斜交,可见一条主枝上的近圆分枝,分枝整体较多对称,分枝呈网状交织在一起,分枝呈簇状或菊花状展布。遗迹化石整体平行于层面,长约 9.5~10.0 cm。主枝直径为 7~8 mm,分枝直径为 1.0~1.2 mm,遗迹化石为半浮雕保存(图 4e)。

该种遗迹在形态上与 *Chondrites* Type-C 近似。

两种遗迹化石最大的区别在于 *Chondrites* Type-C 在岩层中无主枝,而 *Chondrites* cf. Type-C 有主枝,前者造迹生物为垂向造迹,后者为斜向造迹。

产出层位:白柳坪组 B29 层。

3.2.3 克鲁兹迹 *Cruziana* d'Orbigny, 1842

(1) 六景克鲁兹迹 *Cruziana liujingensis* Yang, 1983

保存于灰色泥质粉砂岩中,遗迹平行于层面,遗迹为纵长的二叶型挖掘觅食迹,两排抓痕宽度大概一致,夹角在 135°左右,有的抓痕可见一分为二。整体遗迹平行于层面,每条抓痕宽度在 1.5~2 mm,长约 3 cm,高于层面约 2.0 mm,遗迹整体为半浮雕保存(图 4f)。

本次发现的遗迹化石与 *Planolites beverleyensis* (Billing, 1862) 共生,沉积环境极可能为浅水陆棚地区。岩层与地面斜交,表明在该段经过成岩作用后,受挤压所形成。

产出层位:平驿铺组 B10 层。

(2) 鲁昂欧克鲁兹迹 *Cruziana rouaulti* Seilacher, 1970

Cruziana rouaulti 保存于泥质粉砂岩中,呈纵长二叶型;中沟浅且表面光滑无纹饰,这是该种克鲁兹迹与其他克鲁兹迹最大的不同之处(杨式溥等, 2004)。其宽为 5 mm,长 3.0~3.5 cm,保存类型为半浮雕(图 4g)。

Cruziana 长久以来作为浅海相的具有指向性遗迹化石,该种遗迹化石的出现指示了该层的沉积相为浅海相。且 *Cruziana* 与 *Chondrites*、*Palaeophycos* 共生,证明其古环境为浅海相的缺氧环境。位置为浅水陆棚地区。

产出层位:白柳坪组 B29 层。

3.2.4 漫游迹 *Planolites* Nicholson, 1873

贝弗利漫游迹 *Planolites beverleyensis* Billing, 1862

保存在灰色泥质粉砂岩中,平行于层面且不分枝,表面粗糙无衬壁,遗迹化石内部为灰色粉砂充填;直径约为 4~5 mm,长约 6 cm。该遗迹多见于灰黑色泥岩和粉砂质泥岩中,其保存方式为全浮雕保存(图 4f、h)。

该遗迹种与 *Palaeophycus* 相似,区别在于该遗迹为主动充填无衬壁,而 *Palaeophycus* 为被动充填

且具有较薄衬壁;*Pl. beverleyensis*直或略弯曲,填充物颜色比围岩浅。造迹生物为食沉积物动物,该遗迹是其造迹生物觅食形成觅食构造(杨式溥等,2004)。

产出层位:平驿铺组B10层,白柳坪组B29层。

3.2.5 圆锥迹 *Cylindrichnus* Toots in Howard, 1966

同心圆锥迹 *Cylindrichnus concentricus* Toots, 1966

保存于灰色细砂岩中,为在垂向上上粗下细的圆锥状潜穴。在遗迹化石底部略微弯曲,横切面为椭圆形,在其横切面上可见同心圆环。其直径为15~20 mm,长5.0~5.8 cm。该遗迹化石保存类型为全浮雕保存(图4i)。

还种遗迹与*Skolithos*的相似之处在与两者均为垂向生长;不同之处在于*Skolithos*上下粗细基本一致,而*Cylindrichnus*在垂向上表现为上粗下细,且*Skolithos*在横切面上没有同心层结构。*Cylindrichnus*该遗迹种为滤食性动物形成的居住-觅食潜穴系统,常见于近滨环境。该遗迹种为*Skolithos*遗迹相或*Cruziana*遗迹相的始端(杨式溥等,2004),即*Skolithos*遗迹相和*Cruziana*遗迹相的过渡环境。

产出层位:甘溪组B49层。

3.2.6 洛克迹属 *Lockeia* James, 1879

枣形洛克迹 *Lockeia siliquaria* James, 1879

分布范围较广,主要保存在灰褐色泥质粉砂岩中,个体较小,在平面上呈果核状的凸起;其分布较为密集,在表面光滑无饰,延伸方向基本一致,但也有个别不太一致。其直径在0.8~1 cm,凸起高于层面约7~9 mm,为半浮雕保存(图4j)。

该遗迹与*Chondrites*,*Palaeophycus*等遗迹种共生,证明其生活环境与*Chondrites*的环境一致,均为浅水陆棚地区。该遗迹化石的造迹生物可能为双壳类(Seilacher. et al.,1994;白忠凯等,2004;Uchman. et al.,2004)。

产出层位:白柳坪组B29层。

3.2.7 单形迹 *Monomorphichnus* Crimes, 1970

单线单形迹 *Monomorphichnus linearis* Crimes, 1977

保存在泥质粉砂岩中,整体为几条平行的单线组成,单线为平直或弯曲,单线长2~3 cm,直径为2~3 mm;每条单线与单线间的间隔为3.5~6 mm,遗迹与丛藻迹共生保存方式为半浮雕(图5a)。

本次发现的单线单形迹较杨式溥的描述比较小,但符合单线单形迹特征。该种遗迹的造迹生物为类三叶虫动物(Pandey et al., 2014)停息所形成;*Monomorphichnus linearis*与*Chondrites*共生,证明其生活环境与*Chondrites*一致,为浅海相的浅水陆棚。

产出层位:白柳坪组B29层。

3.2.8 古藻迹 *Palaeophycus* Hall, 1847

管状古藻迹 *Palaeophycus tubularis* Hall, 1847

保存于灰褐色细砂岩中,外形为柱型潜穴,具有较薄衬里;不分枝,表面光滑无饰。其颜色同母岩一致,平行于层面,保存类型为半浮雕且平行于层面。其直径约为7.5 mm,长约3.2 cm(图2f)。

*Palaeophycus tubularis*遗迹种最显著特征就是其潜穴壁薄且外表光滑;张立军等(2013)曾指出其造迹生物为多毛类,并且为广海相遗迹。该种遗迹在龙门山下泥盆统中比较多见,沉积环境为浅海陆棚环境。

产出层位:白柳坪组B29层,养马坝组B91层。

3.2.9 拟藻迹 *Phycodes* Richter, 1850

(1)掌状拟藻迹 *Phycodes palmatus* Hall, 1850

保存在灰色泥质粉砂岩中,遗迹化石在分枝处较为粗大,分枝沿主枝及两侧方向展开,是平行于层面的束状潜穴,分枝之间无交叉,分枝处直径为2.5~2.7 cm,分枝宽为0.5~2.5 cm,长7.5~8 cm,遗迹化石整体为半浮雕保存(图5b)。

本次发现的遗迹化石整体呈掌状分布,且整体较大;在分枝处为几条较粗的分枝,为*P.palmatus*,Häntzschel(1975)认为,该种遗迹化石的造迹生物为环节动物形成的觅食构造,与克鲁兹迹(*Cruziana*)同为*Cruziana*遗迹相的指向化石,故其古环境为浅水陆棚环境。

产出层位:平驿铺组B12层。

(2)乌海拟藻迹 *Phycodes wuhaiensis* Yang, 1990

保存在灰色泥质粉砂岩中,遗迹化石平行于层面,主枝和分枝较细,为二分枝。在分枝处分枝夹角较大,呈人字形。遗迹化石长3~3.2 cm,分枝长约4.3 cm,主枝直径为3.5~4.0 mm,分枝直径在3.5 mm左右。遗迹化石为半浮雕保存(图5c)。

*Phycodes wuhaiensis*与*Phycodes circinatus*相似,但该种拟藻迹最大的特点为在分枝处为二分,且整体为人字形分布,分枝之间夹角较大,一般在

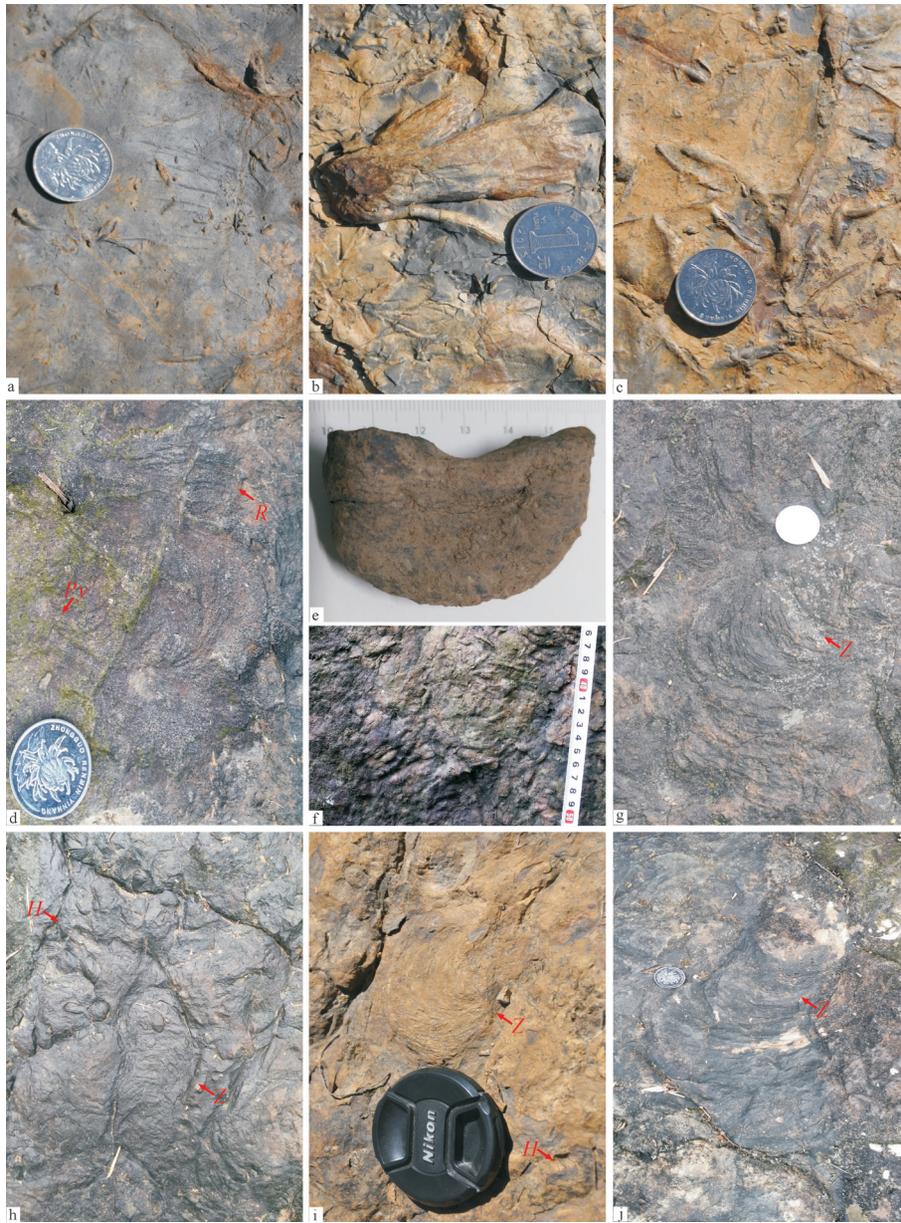


图5 龙门山地区早—中泥盆世混积相遗迹化石类型野外照片

a—*Monomorphichnus linearis*, 白柳坪组, B29层, 鹰嘴岩剖面; b—*Phycodes palmatus*, 平驿铺组, B12层, 木耳厂剖面; c—*Phycodes wuhaiensis*, 白柳坪组, B29层, 鹰嘴岩剖面; d—遗迹化石 *Phycodes* isp. 和 *Rusophycus lungmenshanensis* 组合, 白柳坪组, B39层, 甘溪剖面; e—*Rhizocorallium jenense*, 谢家湾组, B55层, 甘溪剖面; f—*Thalassinoides* isp., 观雾山组, B115层, 猿王洞剖面; g—*Zoophycos circinatum*, 白柳坪组, B39层, 甘溪剖面; h—*Zoophycos crassum* 和 *Howellella*, 白柳坪组, B39层, 甘溪剖面; i—*Zoophycos circinatum*, 白柳坪组, B39层, 鹰嘴岩剖面; j—*Zoophycos* isp., 白柳坪组, B39层, 甘溪剖面。其中 Py—*Phycodes* isp., R—*Rusophycus lungmenshanensis*, Z—*Zoophycos*, H—*Howellella*

Fig.5 Field photographs of trace fossils of hybrid facies from Early-Middle Devonian strata in Longmenshan area

a— *Monomorphichnus linearis*, Bailiuping Formation, B29 Bed, Yingzuiyan profile; b— *Phycodes palmatus*, Pingyipu Formation, B12 Bed, Muerchang profile; c— *Phycodes wuhaiensis*, Bailiuping Formation, B29 Bed, Yingzuiyan profile; d— *Phycodes* isp.coexistent with *Rusophycus lungmenshanensis*, Bailiuping Formation, B39 Bed, Ganxi profile; e— *Rhizocorallium jenense*, Xiejiawan Formation, B55 Bed, Ganxi profile; f— *Thalassinoides* isp., Guanwushan Formation, B115 Bed, Yuanwangdong profile; g— *Zoophycos circinatum*, Bailiuping Formation, B39 Bed, Ganxi profile; h— *Zoophycos crassum* coexisted with *Howellella*, Bailiuping Formation, B39 Bed, Ganxi Profile; i— *Zoophycos circinatum*, Bailiuping Formation, B39 Bed, Ganxi profile; j— *Zoophycos* isp., Bailiuping Formation, B39 Bed, Ganxi profile. Py, R, Z and H represent *Phycodes* isp., *Rusophycus lungmenshanensis*, *Zoophycos* and *Howellella*, respectively

90°左右。*Phycodes circinatus* 为一条主枝,分枝潜穴成扫帚状。本次发现的 *Phycodes wuhaiensis* 与 *Phycodes palmatus* 共生,故其古环境为浅水陆棚。

产出层位:平驿铺组 B12 层,白柳坪组 B29 层。

(3) 拟藻迹未定种 *Phycodes isp.*

保存于灰色粉砂岩中,与层面平行的水平潜穴。呈扇面状展开,主枝细小有分枝,分枝之间没有交叉,主枝直径在 2.7~3.2 mm,分枝直径 2.5~2.7 mm。该遗迹种为半浮雕保存(图 5d)。

在已发现的 *Phycodes* 遗迹种中,较为常见的有 *P. pedum*、*P. palmatus*、*P. circinatus* 和 *P. coronatus*。其中,*P. pedum* 末端呈镰刀形分枝,且分枝绕过主枝;*P. palmatus* 呈掌状分枝;*P. circinatus* 始端平行不分枝,末端具锐角分枝且分枝呈扫帚状;*P. coronatus* 潜穴为圆形,边缘向上延伸。本次发现的 *Phycodes* 遗迹种不具上述遗迹种的特征,且只能见到整体为扇形分布,外形与 *P. circinatus* 相似,但缺乏内部更细致的研究;故无法定名。*Phycodes* 造迹生物生活范围较为广阔,范围在近滨—大陆架前端的浅海环境。在本次发现的 *Phycodes* 遗迹化石中,可见 3 种:一种为皱饰迹共生的拟藻迹,另一种为 *Phycodes palmatus*,第三种为 *Phycodes wuhaiensis*。

产出层位:白柳坪组 B39 层。

3.2.10 皱饰迹 *Rusophycus* Hall, 1840

龙门山皱饰迹 *Rusophycus lungmenshanensis* Yang, 1988

保存于灰色粉砂岩中,整体为椭圆形,为二叶型停息迹;遗迹化石前部宽约 2.3 cm,后部宽约 2.3 cm,长轴方向长约 5.3 cm,高出层面约 2.0 mm。在其中后部可见三角空白区,二叶上可见前后两个方向斜脊;遗迹化石为半浮雕保存(图 5d)。

Rusophycus 通常存在于近滨环境,被认为是三叶虫栖息是所留下的痕迹。但该种遗迹化石在陆棚上部浅海区的环境也曾发现(杨式溥,1994;杨式溥等,1996),此次发现保存在粉砂岩中的 *Rusophycus* 遗迹化石,证明其沉积环境水动力较弱,为近滨—浅海陆棚上部环境。

产出层位:白柳坪组 B39 层。

3.2.11 根珊瑚迹 *Rhizocorallium* Zenker, 1850

詹尼赛根珊瑚迹 *Rhizocorallium jenense* Zenker, 1836

保存于薄层状黄褐色粉砂岩中,平行于层面分布。该种遗迹整体呈 U 型,两翼管平行排列,具蹼状构造。单个翼管直径 1.0~1.2 cm,两翼管间距约 6.2 cm,遗迹化石长 4.3~4.5 cm,整体为全浮雕保存(图 5e)。

Rhizocorallium 和 *Diplocraterion parallelum* (Torell, 1870) 在外形上较为相似,外形均为 U 型,且具有蹼状构造。但 *Diplocraterion parallelum* 为垂直保存于地层中,而 *Rhizocorallium* 为平行于层面保存。本次发现的遗迹化石平行于层面,两翼管风化较为严重,从内部可见充填物和围岩一致。

产出层位:谢家湾组 B55 层。

3.2.12 石针迹属 *Skolithos* Haldemann, 1840

线型石针迹 *Skolithos linearis* Haldemann, 1840

保存在灰色细砂岩中且垂直于层面或高度倾斜的柱状潜穴,外表粗糙且无分枝且上下宽度基本一致,颜色相较围岩较深,在其内部充填模式为内部充填,横切面近圆形,在岩层底部可见颗粒状凸起,直径为 0.9~1.2 cm,可见长度约 11 cm(图 2g, h)。

本次发现的 *Skolithos* 遗迹化石上下粗细基本一致,在 *Skolithos* 遗迹种内部为砂岩填充,且两层 *Skolithos* 遗迹化石叠加,*Skolithos* 个体较大且垂直与层面,整体为簇状。为 *S. linearis*;其造迹生物为环节生物,为环节生物居住的潜穴。杨式溥(2004)指出,*Skolithos* 遗迹相中的化石常形成于前滨和滨岸地带的沙洲和沙坝,为受高能量的波浪和水动力的地区产出的遗迹化石。据此分析该种遗迹化石造迹生物生活环境为水动力强的前滨环境。

出产层位:观雾山组 B115 层。

3.2.13 海生迹属 *Thalassinoides* Ehrenberg, 1944

海生迹未定种 *Thalassinoides isp.*

保存在灰色细砂岩中的潜穴系统,常见 T 型与 Y 型分枝,分枝多不规则,分枝处直径较分枝直径略粗大。该种遗迹化石平行于层面且潜穴表面光滑无饰。其直径为 1.6~4.3 mm,长约 5 cm,保存方式为全浮雕(图 5f)。

Thalassinoides 一般认为是由甲壳类动物挖掘形成的居住—觅食潜穴,在潮间带较为常见。本次发现的 *Thalassinoides* 与 *Skolithos* 共生于同一层,表明其形成的沉积环境与 *Skolithos* 相同,为水动力强的前滨的砂质沉积。

产出层位:观雾山组 B115 层。

3.2.14 动藻迹 *Zoophycos Massalongo*, 1855

(1) 旋卷动藻迹 *Zoophycos circinatum* (Brongniart), 1828

保存在灰色细一中砂岩中,具大型蹼状构造的螺旋觅食迹;可见中央和边缘通道,整体为较大的板状构造。整体近椭圆形,长 12~13 cm,两蹼之间最宽处为 8.2 cm。遗迹保存方式为半浮雕保存(图 5g、h)。

杨式溥(2004)将动藻迹分为以下几类:*Z. circinatum*、*Z. crassum* 和 *Z.cf.brianteus*。*Z. circinatum*较大,且可见中央与边缘通道;*Z. crassum*可见大量弯曲的弧线状脊,*Z.cf.brianteus*可见紧密连续的蹼状构造,但个体较小。本次发现的 *Zoophycos* 遗迹化石,描述特征符合 *Z. circinatum* 的特征,且可以看到连续的蹼状构造及边缘通道。

产出层位:白柳坪组第 39 层,养马坝组第 91 层。

(2) 厚动藻迹 *Zoophycos (Spirophyton) crassum* (Hall), 1863

保存在灰黑色细砂岩,灰黄色砂岩中,形状为椭圆形或扇形,具大型蹼状构造,遗迹化石可见由大量弯曲的弧线脊组成;遗迹化石长约 6.7 cm,整体宽约 7.5 cm,高出层面 3~5 mm;其保存方式为半浮雕保存(图 5i)。

Zoophycos crassum 整体近圆形,平面可见中央,其弧线脊呈马尾状分布,现如今其造迹生物仍未确定(王约,2004);本次发现的 *Zoophycos crassum* 与腕足化石共生,且化石保存完整,指示了浅水陆棚的环境。

产出层位:白柳坪组 B39 层。

(3) 动藻迹未定种 *Zoophycos* isp.

保存于灰黑色砂岩中,整体为不规则椭圆形,可见大型蹼状构造与边缘通道,且蹼状构造较为致密地展布与层面,遗迹化石长 25~28 cm,宽 10~12 cm,保存方式为半浮雕(图 5j)。

张立军等(2012)将 *Zoophycos* 分为 9 种,分别是 *Z.cauda-galli*、*Z.curtain*、*Z.velum*、*Z.brianteus*、*Z.villae*、*Z.liasinus*、*Z.flabelliformis*、*Z.insignis*、*Z.rholiense*; *Z.brianteus* 为圆形或椭圆形蹼层,蹼纹由柱形管向外延伸成“J”形辐射;*Z.cauda-galli* 在水平面上边缘管和柱型管构成“U”型回旋;*Z.curtain* 整

体呈“U”型,在“U”形尾部有外延蹼层;*Z.velum* 的大蹼纹和边缘管在尾端据记忆一处;*Z.villae* 其整体轮廓可见抛物线形或叶片 J 形蹼层;*Z.liasinus* 可见整体为 U 型的半圆蹼层,其大蹼纹呈通信排列;*Z.insignis* 的整体轮廓为螺旋桨形蹼层,单个桨叶为舌形的蹼层束;*Z.flabelliformis* 整体呈花瓣状或叶片状;*Z.rholiense* 整体为大型裙带状蹼层,边缘为多个舌状或叶片状突起的蹼层束。而在此次发现的该种遗迹,因为缺少更多证据辨明,故不能定种。

产出层位:白柳坪组 B39 层。

4 遗迹化石组合及其沉积特征分析

4.1 *Skolithos*—*Thalassinoides* 遗迹组合

两者均保存在灰色细砂岩中,但这两种遗迹化石分布在同一层位的不同位置。遗迹化石主要为 *Skolithos linearis*、*Thalassinoides* isp. 等,根据 Taylor 等(1993)提出的生物扰动等级方案划分,其生物扰动较大,达 4 级。该遗迹化石发育层下伏回春河厚层状石英砂岩,向上为中层状含 *Skolithos linearis*、*Thalassinoides* isp. 石英砂岩,发育平行层理、冲洗层理和藻席层,表明该环境为其沉积条件为沉积速度较快且水动力条件较强的无障壁滨岸的前滨亚相沉积环境。该种遗迹化石组合,遗迹化石多垂直于层面,且为滤食性动物的居住迹与觅食迹,造迹生物在水动力较弱期间,迅速向下挖掘至砂质底层形成的垂直潜穴,从而避免被冲刷(施振生等,2004,2005)。

4.2 *Rusophycus*—*phycodes* 遗迹组合

该类遗迹化石组合主要沿灰黑色细砂岩层展布,为半浮雕保存在层位顶部。遗迹化石主要有 *Rusophycus lungmenshanensis*、*phycodes circinatus* 及 *Planolites beverleyensis* 等遗迹化石组成。其生物扰动为 2 级,遗迹化石清晰,且原始沉积层理并无太大扰动。该种遗迹化石组合的造迹生物多为节肢动物(张立军,2013),其生存环境为含氧量低、食物充足、水体能量较小的近滨亚相沉积环境。

4.3 *Chondrites*—*Palaeophycus* 遗迹组合

主要发育于灰褐色粉砂岩中,以半浮雕的方式保存,遗迹化石主要由 *Chondrites* cf. Type-C、*Chondrites* Type-C、*Palaeophycus tubularis* 等。在前人对遗迹化石的研究中, Bromley and Hanken 等

(2003)指出 *Chondrites* 是在去缺氧的环境中形成,一般位于氧含量濒临于零的界面附近,其遗迹生物多为滤食性和捕食性动物形成的觅食迹。该种遗迹化石的组合指示的沉积环境为缺氧,水体较深,水动力条件较弱的近滨下部沉积环境(张立军等,2013)。

4.4 *Zoophycos*—*Palaeophycus* 遗迹化石组合

在 B91 层中发育的 *Zoophycos circinatum* 与 *Palaeophycus tubularis* 等共生,该遗迹化石组合保存在风暴沉积序列浪成沙纹段的细纱岩中。风暴序列包含多种类型的风暴沉积构造,如冲刷面、丘状交错层理、洼状交错层理等(图 2e)。*Zoophycos* 与这些沉积构造的组合表明 *Zoophycos* 生活环境为浅水陆棚环境中。

5 遗迹化石组合的古地理环境意义分析

5.1 龙门山地区早—中泥盆世的古地理环境

根据对龙门山地区早—中泥盆世混合相研究,结合该区古遗迹化石类型及其组合特征,认为龙门山地区早—中泥盆世反映的古环境总体呈滨海—浅海相(图 6),其中, *Cylindrichnus concentricus*、*Skolithos linearis* 和 *Thalassinoides* isp. 等遗迹化石反映了滨海环境; *Chondrites cf. fenxiangensis*、*Chondrites targonii*、*Chondrites* isp.、*Cruziana rouaulti*、*Lockeia siliquaria*、*Monomorphichnus linearis*、*Palaeophycus tubularis*、*Phycodes* isp.、*Planolites beverleyensis*、*Rhizocorallium* 和 *Rusophycus lungmenshanensis* 等一系列遗迹化石则反映了浅水陆棚沉积, *Zoophycos circinatum*,

Zoophycos crassum 和 *Zoophycos* isp. 的出现则同样反映了浅海沉积。总的说来,龙门山地区早泥盆世平驿铺组为一套滨岸—浅水陆棚相沉积,白柳坪组则反映了一套正常浅水陆棚相沉积,甘溪组下部为近滨沉积、上部则为浅水陆棚沉积,谢家湾组为正常浪基面—风暴浪基面以上的风暴岩沉积,中泥盆世养马坝组为一套位于正常浪基面以下,风暴浪基面以上的浅海陆棚沉积,观雾山组下部的碎屑岩沉积则为前滨环境。

5.2 *Zoophycos* 化石的沉积环境意义

在龙门山地区白柳坪组 B39 层灰色粉砂岩中保存的厚动藻迹 *Zoophycos crassum*,在砂岩层面上不但可看 *Zoophycos* 与腕足介壳富集层共生(图 2c),而且与波痕在同一层面, *Zoophycos* 切穿波痕(图 2d), *Zoophycos* 遗迹化石呈螺旋形,且整体呈扇形展布于层面。与 *Zoophycos* 共生的层面上,腕足介壳保存,而且多数呈凸面向上,表明其没有遭受长时间的波浪作用地破坏,而是受到较弱的风暴浪簸扬作用,使得介壳处于凸面向上的稳定状态,该沉积位于正常浪基面和风暴面之间的浅海环境(Li et al., 2016)。 *Zoophycos* 与波痕共生,表明其沉积时深度最大可到正常浪基面附近。该组合可能指示了当初的沉积环境为水动力较强、食物丰富的浅海地区。

而保存在 B91 层的旋卷动藻迹 *Zoophycos circinatum* 与管状古藻迹 *Palaeophycus tubularis* 等共生于风暴沉积序列的泥质岩中,同样表明 *Zoophycos* 生活环境为浅海陆棚沉积环境。众多的研究也表明, *Zoophycos* 从古生代到中生代和新生代呈现出由浅水向深水迁移的趋势(Wetzel et al.,

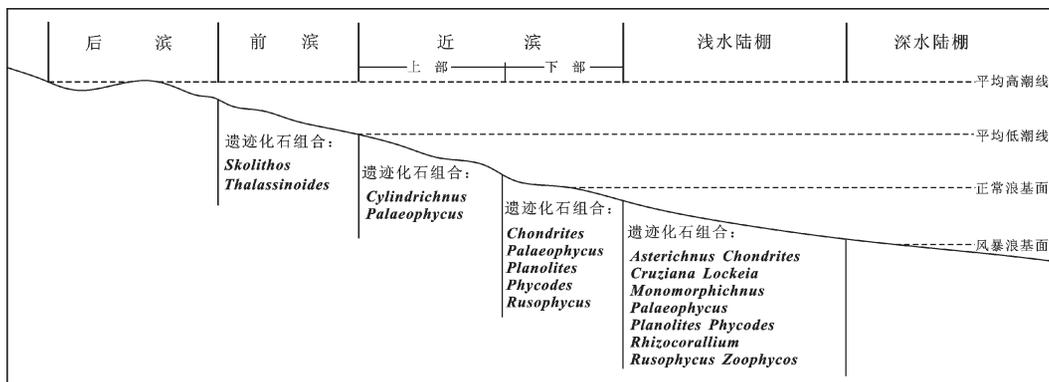


图 6 龙门山地区早—中泥盆世混积相遗迹化石生活环境分布模式

Fig. 6 The distribution model of trace fossils of hybrid facies and their living environment in Early–Middle Devonian period in Longmenshan area

1981; Ekdale et al., 1984; 杨式溥, 1984; 王尚彦, 1989; 杨瑞东等, 1995; Bromley et al., 2003; Richiano, 2015; Zhang et al., 2015)。

由此可见,发育于龙门山泥盆系混积相中的遗迹化石 *Zoophycos* 生活环境为浅水陆棚环境。

6 结论

(1) 龙门山地区早—中泥盆世混积相海相沉积中保存居住迹、觅食迹和停息迹在内的5大类, 14种遗迹化石, 其分别为: 居住迹: *Skolithos*; 进食迹: *Chondrites*、*Phycodes*、*Planolites*、*Rhizocorallium*、*Thalassinoides* 和 *Zoophycos*; 觅食迹: *Cylindrichnus* 以及 *Palaeophycus*; 爬行迹: *Cruziana* 和 *Monomorphichnus*; 停息迹: *Asterichnus*、*Lockeia* 和 *Rusophycus*。

(2) 遗迹化石组合类型有4种类型, 包括: *Skolithos—Thalassinoides* 遗迹组合, *Rusophycus—Phycodes* 遗迹组合, *Chondrites—Palaeophycus* 遗迹组合, *Zoophycos—Palaeophycus* 遗迹化石组合, 分别代表了不同的沉积环境与水体深度, 据此建立了龙门山地区早—中泥盆世混积相遗迹化石生活环境分布模式图。龙门山地区早—中泥盆世遗迹化石多为滨海—浅海相的遗迹化石, 反映该时期龙门山地区总体沉积环境为滨海—浅海沉积环境。

(3) 龙门山地区早—中泥盆世发现的3种类型 *Zoophycos* 遗迹化石, 可与腕足介壳富集层、波痕、丘状交错层理和洼状交错层理等反映浅水环境的沉积特征共存, 表明泥盆纪 *Zoophycos* 形成于浅水环境。

References

- Bai Zhongkai, Hu Bin, Qi Yongan, Zhang Guocheng. 2008. Trace fossils in the Silurian Kepingtage Formation in the Kalpin Area, Xijiang[J]. Acta Geologica Sinica, 82(9): 1161–1168 (in Chinese with English abstract).
- Bromley R G, Hanken N M. 2003. Structure and function of large, lobed *Zoophycos*, Pliocene of Rhodes, Greece[J]. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 192, 79–100.
- Cheng Hongguang, Li Xinqing, Yuan Honglin, Wang Kezhao, Wang Bing, Cheng Jianzhong. 2008. The oceanic environment during the Early Devonian in Longmenshan Area: Geochemical evidence from brachiopod shells[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 26(6): 897–903 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuanren, Wang Hongfeng. The comprehensive stratigraphic framework of Devonian in Longmenshan area, Sichuan, China[C]. //Liu Wenjun, Chen Yuanren, Zheng Rongcai(eds.). Sequence Stratigraphy. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1996: 12–29 (in Chinese with English abstract).
- Ekdale A A, Bromley R G. 1984. Comparative ichnology of shelf–sea and deep–sea chalk[J]. Journal of Paleontology, 58(2): 322–332.
- Gao Lianda. 1997. Acritarchs from Lower Devonian Ganxi and Xiejiawan Formations in Longmenshan mountains, Sichuan[J]. Acta Geologica Gansu, 6(1): 16–22 (in Chinese with English abstract).
- Häntzschel W. 1975. Trace fossils and problematica[C]//Teichert G (ed.). Treatise on Invertebrate Paleontology, part W, Miscellanea, Supplement 1. Lawrence, K S, USA: Geological Society of America and University of Kansas Press, 1–269.
- Hou Hongfei, Wang Zhengquan, Xian Siyuan. 1988. The Stratigraphic Paleontology and Sedimentary Facies of Devonian in Longmen Mountain Area, Sichuan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–100 (in Chinese with English abstract).
- Li Fengjie, Qu Xuelin, Du Lingchun, Jing Xigui, Cheng Xiaoyu. 2015. Carbonate facies and sedimentary evolution of Upper Devonian Tuqiaozi Formation in Ganxi section of Longmen Mountain[J]. Lithologic Reservoirs, 27(5): 6–12 (in Chinese with English abstract).
- Li F J, Qu X L, Du L C, Dai T Y, Yang Y C, Li J W, Yang C J. 2016. Genetic processes and environmental significance of Lower Devonian brachiopod shell concentrations in Longmenshan area, Sichuan, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 115: 393–403.
- Li Fengjie, Du Lingchun, Qu Xuelin, Jing Xigui, Cheng Xiaoyu. 2016. Analysis of carbonate sequence stratigraphy of Upper Devonian Tuqiaozi Formation in Ganxi section of Longmenshan area[J]. Science Technology and Engineering, 16(1): 155–161 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianghui, Liu Wenjun, Zheng Rongcai. 1996. Hybrid facies and sequences of a mixed siliciclastic–carbonate of Early–Mid Devonian in Formountain belt, Longmenshan[C]//Liu Wenjun, Chen Yuanren, Zheng Rongcai(eds.). Sequence Stratigraphy. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 46–61 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wenjun, Chen Yuanren, Zheng Rongcai, Wang Hongfeng, Li Xianghui. Devonian sequence stratigraphy and relative sea–level changes in Longmenshan area, Sichuan[C]//Liu Wenjun, Chen Yuanren(eds.). Sequence Stratigraphy. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1996: 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wenjun, Zheng Rongcai, Li Xianghui. 1999. Reconstruction of palaeogeography and palaeotectonics of a Devonian sedimentary basin in the Longmenshan Area, Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 73(2): 109–119 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenqiu, Liu Zongwen, Wang Hongfeng. 1986. The approach to

- vertical U-shaped spreiten-burrow and Lower Devonian Pingyipu Formation nearshore-foreshore depositional environments, Longmen Mountain, Sichuan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 6(3): 121-131 (in Chinese with English abstract).
- Pandey D K, Uchman A, Kumar V, Shekhawat R S. 2014. Cambrian trace fossils of the Cruziana, ichnofacies from the Bikaner-Nagaur Basin, north western Indian Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 81(4):129-141.
- Richiano S. 2015. Environmental factors affecting the development of the Zoophycos ichnofacies in the Lower Cretaceous Río Mayer Formation (Austral Basin, Patagonia). Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.,439:17-26.
- Seilacher, A. 1967. Bathymetry of trace fossils[J]. Marine Geology,5: 413-428.
- Seilacher A, Seilacher E. 1994. Bivalvian trace fossils:a lesson from actiopaleontology[J]. Cour. Forsch. Inst. Senckenb, 169: 5-15.
- Shi Zhensheng, Zhu Xiaomin, Wang Guiwen, Zhong Dakang Zhang Xinpei. 2004. Silurian ichnoassemblages of Talimu basin and their sedimentary environments[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition),19(4):32-35 (in Chinese with English abstract).
- Shi Zhensheng, Zhu Xiaomin, Wang Guiwen, Zhong Dakang Zhang Xinpei. 2005. Trace fossils of tidal flat Tataertage Formation (Silurian) in central Tarim basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica,23 (1):91-99 (in Chinese with English abstract).
- Taylor A M, Goldring R. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric[J]. Journal of the Geological Society, 1993, 150(1): 141-148.
- Uchmana A, Drygant D, Paszkowski M, Porebski S J, Turnau E. 2004. Early Devonian trace fossils in marine to non-marine redbeds in Podolia, Ukraine: palaeoenvironmental implications[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 214: 67-83.
- Wang Shangyan. 1989. The discovery of Zoophycuses in Lower carboniferous series in Guizhou[J]. Guizhou Geology, 6(2): 117-122 (in Chinese with English abstract).
- Wei Qinlian, Zheng Rongcai, Zhou Gang, Xiao Ling. 2011. Clastic tempestite in Xiejiawan member of Ganxi Formation within Longmenshan area and its significance[J]. Geology in China,38(5): 1282-1288 (in Chinese with English abstract).
- Wetzel A, Werner F. 1981. Morphology and ecological significance of Zoophycos in deep-sea sediments off NW Africa[J]. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 32, 185-212.
- Wang Yue. 2004. The Approach To palaeoecology of ichnofossil Zoophycos from Middle Devonian in Dushan county, Guizhou Province[J]. Acta Palaeontologica Sinica,43(4): 591-596 (in Chinese with English abstract).
- Xian Siyuan, Chen Jirong, Wang zhengquan. 1995. Devonian ecostratigraphy, sequence stratigraphy and sea-level changes in Ganxi, Longmen mountain area, Sichuan[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 15(6): 1-47 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Yan Chengxi, Wang Chengyuan, Chen Wenyi. 1995. The carboniferous trace fossils in Guizhou: discussion on distribution of *Zoophycos* throughout geologic history[J]. Guizhou Geology,12(4): 290-297 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shipu. 1984. The discovery of Zoophycos in China and its environmental significance[J]. Oil & Gas Geology, 5(3): 228-235 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shipu, Zhang Jianping, Yang Meifang. 2004. Trace Fossils of China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lijun, Gong Yiming. 2012. Systematic revision and ichnotaxonomy of *Zoophycos*[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 37(S1):60-79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lijun, Gong Yiming. 2013. Ichnocoenosis of the Lower Devonian Pingyipu Formation, Longmen mountain, Sichuan[J]. Acta Palaeontologica Sinica,52(1): 86-95 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L J, Fan R Y, Gong Y M. 2015. Zoophycos macroevolution since 541 Ma[J]. Scientific Reports. 5:14954, 1-10.

附中文参考文献

- 白忠凯, 胡斌, 齐永安, 张国成. 2008. 新疆柯坪地区志留系柯坪塔格组的遗迹化石[J]. 地质学报, 82(9): 1161-1168.
- 程红光, 李心清, 袁洪林, 王克卓, 王兵, 程建中. 2008. 龙门山地区早泥盆世古海洋环境——来自腕足类壳体的地球化学证据[J]. 沉积学报, 26(6): 897-903.
- 陈源仁, 王洪峰. 四川龙门山区泥盆纪综合地层格架[C]//刘文均, 陈源仁, 郑荣才. 层序地层. 成都科技大学出版社, 1996: 12-29.
- 高联达. 1997. 四川龙门山下泥盆统甘溪组和谢家湾组疑源类[J]. 甘肃地质学报, 6(1): 16-24.
- 侯鸿飞, 万正权, 鲜思远主编. 1988. 四川龙门山地区泥盆纪地层古生物及沉积相[M]. 北京:地质出版社, 1-100.
- 李凤杰, 屈雪林, 杜凌春, 荆锡贵, 成晓雨. 2015. 龙门山甘溪土桥子组碳酸盐岩沉积相及其演化[J]. 岩性油气藏, 27(5): 6-12.
- 李凤杰, 屈雪林, 杜凌春, 荆锡贵, 成晓雨. 2016. 龙门山区甘溪土桥子组碳酸盐岩层序地层分析[J]. 科学技术与工程, 16(1):155-161.
- 李祥辉, 刘文均, 郑荣才. 川西前龙门山带早一中泥盆世硅质碎屑岩与碳酸盐的混积相和混积层序[C]//刘文均, 陈源仁, 郑荣才. 层序地层. 成都: 成都科技大学出版社, 1996: 46-61.
- 刘文均, 陈源仁, 郑荣才, 王洪峰, 李祥辉. 1996. 龙门山地区泥盆纪层序地层划分、对比和海平面相对变化[C]//刘文均, 陈源仁, 郑荣才. 层序地层. 成都: 成都科技大学出版社, 1-11.
- 刘文均, 郑荣才, 李祥辉. 1999. 龙门山泥盆纪沉积盆地的古地理和古构造重建[J]. 地质学报, 73(2): 109-119.
- 林文球, 刘宗文, 王洪峰. 1986. 四川龙门山平驿铺组沉积环境及 U

- 形蹼状构造潜穴探讨[J]. 矿物岩石, 6(3): 121-131.
- 施振生, 朱筱敏, 王贵文, 钟大康, 张新培. 2004. 塔里木盆地志留系遗迹化石组合及其沉积环境[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 19(4): 32-35.
- 施振生, 朱筱敏, 王贵文, 钟大康, 张新培. 2005. 塔里木盆地塔中地区志留系塔塔埃尔塔格组潮坪沉积中的遗迹化石[J]. 沉积学报, 23(1): 91-99.
- 王尚彦. 1989. Zoophycos 在贵州下石炭统发现[J]. 贵州地质, 6(2): 117-122.
- 魏钦廉, 郑荣才, 周刚, 肖玲. 2011. 龙门山甘溪组谢家湾段风暴岩沉积特征及其意义[J]. 中国地质, 38(5): 1282-1288.
- 王约. 2004. 贵州独山中泥盆世动藻迹生态习性探讨[J]. 古生物学报, 43(4): 591-596.
- 鲜思远, 陈继荣, 万正权. 1995. 四川龙门山甘溪泥盆纪生态地层、层序地层与海平面变化[J]. 岩相古地理, 15(6): 1-47.
- 杨瑞东, 颜承锡, 汪成元, 陈文一. 1995. 贵州石炭纪遗迹化石—兼论 Zoophycos 在地史时期的古地理分布[J]. 贵州地质, 12(4): 290-297.
- 杨式溥. 1984. Zoophycos 在中国的发现及其环境意义[J]. 石油与天然气地质, 5(3): 228-235.
- 杨式溥, 张建平, 杨美芳. 2004. 中国遗迹化石[M]. 北京: 科学出版社, 1-353.
- 张立军, 龚一鸣. 2012. 遗迹化石 Zoophycos 的系统修订与分类[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 37(S1): 60-79.
- 张立军, 龚一鸣. 2013. 四川龙门山地区下泥盆统平驿铺组的遗迹化石[J]. 古生物学报, 52(1): 86-95.

“地球透镜计划”数据证实北美地下存在巨大地幔柱

“The Earth Scope Plan” data affirm the existence of a gigantic mantle plume under North America

2018年3月26日,英国《自然·地球科学》杂志在线发表一项地球科学研究称,通过“地球透镜计划”(Earth Scope)数据,科学家发现了地球核幔边界处升起的一个地幔柱,美国西部黄石国家公园的火山活动很可能是受其驱动。

此前几十年来,人们一直热议的一个问题,就是黄石国家公园下面是否可能存在地幔柱——潜在的物质上涌形成的热柱。但地幔柱本身存在争议,因为地球内部的地震图像,基本无法清晰地显示出源自地幔深处的柱样特征。

“地球透镜计划”由美国国家科学基金会、地质调查局、国家航空航天局等机构发起,是一个广泛、多目标并结合了多种观测方法的计划,被认为可以拓展地球科学的观测能力。此次,美国德州大学奥斯汀分校研究人员彼得·尼尔森与斯蒂芬·格兰德团队,使用了“地球透镜计划”的美国观测台阵项目(USArray)收集到的数据。USArray项目可视为一个大陆规模的地震观测台阵,有能力提供岩石圈和地球更深处的连续三维图像。研究团队对北美下方地幔进行成像处理,鉴别出一个长而细的倾斜区域,地震波在其中的传播速度较慢——这可能表明



黄石国家公园的“老忠实间歇泉”(图片来自网络)

存在异常高温的物质。该区域几乎连续贯穿整个地幔,下起于墨西哥下方的核幔边界,沿东北方向上连至黄石国家公园。

研究人员表示,该发现意味着黄石国家公园的火山活动,包括热水泉、爆发式间歇泉(如著名的“老忠实间歇泉”)和地质时期的超级喷发,追根究底可能都是由从地核升起的深层地幔柱驱动形成的。