

鄂尔多斯盆地延长组遗迹化石组合与古环境

傅强¹, 徐铮¹, 姚泾利², 李璟¹

(1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018)

摘要: 通过对野外剖面、钻井岩芯中遗迹化石组合的分析发现, 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长期发育的湖泊地层中主要有垂直居住迹 (*Skolithos* 和 *Cylindricum*)、垂直觅食迹 (*Scoyenia*)、U 形管迹 (*Arenicolites*)、潜穴迹 (*Planolites*、*Chondrites* 和 *Teichichnus*)、水平迹 (*Protopaleodictyon*)、逃逸迹 (*Fugichnia*)、游泳迹及根迹。结果表明: 遗迹化石的分布和组合与鄂尔多斯盆地晚三叠世湖盆的沉积环境相匹配, 这对于利用遗迹化石组合恢复湖盆岩相古地理具有重要的地质意义。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 晚三叠世湖盆; 遗迹化石; 古环境

中图分类号: P512.2

文献标志码: A

Geological Environment of Trace Fossil Assemblage in Yanchang Formation, Ordos Basin

FU Qiang¹, XU Zheng¹, YAO Jingli², LI Jing¹

(1. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Low Permeability Oil and Gas Field Exploration and Development of National Engineering Laboratory, Xi'an 710018, China)

Abstract: Through the filed profiles and the trace fossil assemblages from well core, we found that the lake stratum of Yanchang Formation in Ordos Basin were mainly developed in eight relics types: vertical dwelling trace (*Skolithos* and *Cylindricum*), vertical browsing trace (*Scoyenia*), U-tube trace (*Arenicolites*), burrow trace (*Planolites*, *Chondrites* and *Teichichnus*), horizontal trace (*Protopaleodictyon*), escape trace (*Fugichnia*), nekton trace and root trace. It is shown that the distribution and assemblage of trace fossils matches the sedimentary environment of the Late Triassic lake basin in Ordos Basin, reflecting the geological value of the restoration of lithofacies palaeogeography by the use of trace fossil assemblages.

Key words: Ordos Basin; Late Triassic lake basin; trace

fossil; paleoenvironment

在晚三叠世中-晚期, 鄂尔多斯盆地西部造山带大幅度抬升从而发生了强烈的冲断、褶皱、叠置甚至推覆等构造活动, 使得华北地块西缘极度下沉, 加上海水不时地入侵, 于是形成了大型坳陷型湖盆。来自西部造山带的粗粒沉积物在盆地西侧形成了冲积扇-辫状河三角洲沉积体系; 来自东北部地台区的沉积物则在盆地东侧构筑成了冲积平原和曲流河三角洲沉积体系, 富含有机质的细粒沉积物分布于靠近盆地西缘的沉积中心内^[1]。晚三叠世末期, 盆地西缘构造活动减弱, 沉积作用变得平缓, 原来规模颇大的湖泊逐渐被沼泽化三角洲和冲积平原所取代, 形成了一套含煤的暗色陆源碎屑组合, 最后结束了湖盆发育过程^[2]。

鄂尔多斯盆地晚三叠世时期发育的湖盆面积较大, 湖水升降频繁, 残留在鄂尔多斯盆地内(不包括向东南郑州方向延伸和向北西甘肃方向扩展)最大扩张期深水湖盆的范围就超过 10^5 km²。通过对湖相泥岩采用不同地球化学方法(包括微量元素、沉积磷酸盐和碳氧同位素等)的研究发现, 鄂尔多斯盆地晚三叠世湖盆湖水属半咸-淡水性质, 适合多门类的动物和低等水生植物生长与繁殖, 它们的死亡为中生代地层提供了优质的生烃母质。随着近年来鄂尔多斯盆地石油勘探的不断深入, 勘探领域逐渐向深湖区展开, 并在深湖区域发现了较大面积的致密砂岩油藏^[3]。因此, 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长期湖盆沉积岩相古地理的恢复、湖盆水体分布范围乃至深度预测就成为勘探家亟待解决的问题。通过野外剖面及钻井岩芯古生物遗迹化石的组合探讨湖盆水体中生物相态发育情况和恢复湖盆水体深浅与沉积相范围的耦合关系^[4], 不仅具有古生物环境与沉积学研

收稿日期: 2017-05-02

基金项目: 国家重大科技专项(2016ZX05050)

第一作者: 傅强(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为海洋资源地质。E-mail: fuqiang@tongji.edu.cn

究的理论意义,还对盆地内非常规致密油气勘探具有重要的现实意义.

水体中底栖生物通过各种活动在沉积物中留下... 我国陆相盆地部分地区或层位的生物遗迹对储层物性的影响也有许多案例. 方少仙等[6]指出,广西百色盆地第三系储层中古生物扰动的强度和含油气级别成正比;赵澄林[7]认为,辽东湾东营组中生物扰动改善了粉细砂岩储层的储集性能及含油性. 鄂尔多斯盆地晚三叠世发育大型淡水湖盆,野外及钻井岩芯发现延长组地层中生物遗迹化石丰富,属较深水环境的鱼类化石及其游泳遗迹也偶有发现,因此依据遗迹化石发育类型、丰度、位置等信息,可以对延长组的古湖泊环境进行恢复[8-12].

通过野外考察环盆地周围纳水河剖面、延河剖面、窟野河剖面、仕望河剖面、薛峰川剖面、铜川剖面等 6 条晚三叠世延长组地层露头剖面的古生物遗迹化石面貌(见图 1),结合钻井岩芯发现并采集的古生物遗迹化石,判断鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组地层中含有极其丰富的反映湖盆发育古生态、古环境

等方面信息的古生物遗迹化石. 依据化石组合特征、发育丰富程度与组合特征以及化石产出围岩岩性,并结合保留下来的现代生物种属的生态环境[13-15],可推测并判断出鄂尔多斯盆地晚三叠世古湖盆发育时期的古生态环境.

1 延长组遗迹化石类型及特征

钻井岩芯描述与野外剖面考察表明,鄂尔多斯盆地延长组除含有丰富的动植物实体化石外,还含有丰富的动植物遗迹化石. 按遗迹化石的几何形状、特征,可大致划分为以下几种类型:

(1)垂直居住迹

以 *Skolithos* 和 *Cylindricum* 为代表,无论在钻井岩芯还是在露头剖面上,此类遗迹化石均大量分布. 它是动物生存并永久居住的场所,在形态上往往呈密集群体出现的垂直管状体,管的大小与密集程度均有较大变化. 绝大多数为泥质基底,管中充填物大多为上覆地层的砂质物,颜色及成分上可与基质区分,发育于高能浅水环境(见图 2).

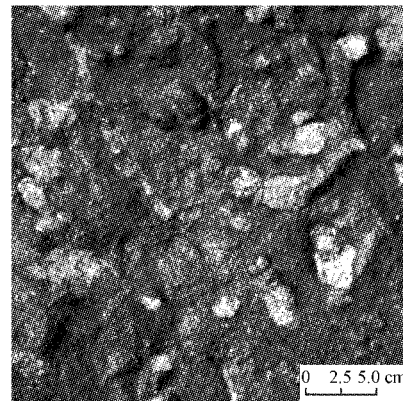


图 2 垂直居住迹(池 32 井,2 342.7 m,长 6)
Fig.2 Vertical dwelling trace (Chi 32 well, 2 342.7 m, Ch 6)

(2)垂直觅食迹

以 *Scoyenia* 为代表,它是一种垂直或略倾斜、具回填构造的觅食潜穴,主要是底栖动物为寻找食物而采取的一种掘穴方式. 与垂直居住迹的显著区别在于管中具有回填构造,同样发育于高能浅水环境(见图 3).

(3)U形管迹

以 *Arenicolites* 为代表,在形态上呈 U 字型,多与层面倾斜或垂直. 居住在 U 形潜穴内的动物随着个体不断增长或当沉积速率以及侵蚀速率加剧时,U 形管道不断迁移变化,其留下的痕迹称为横蹠构

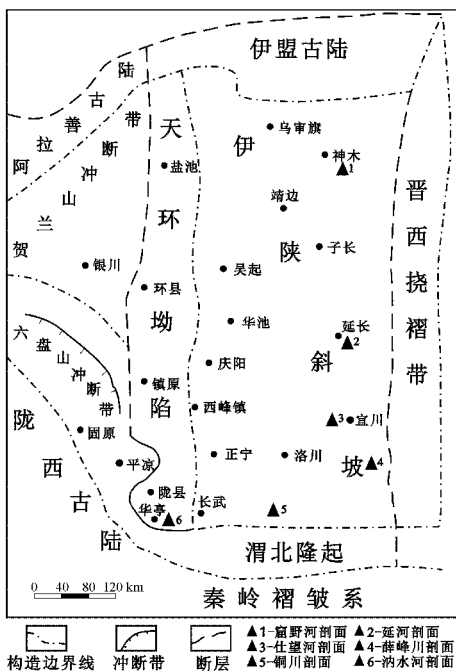


图 1 鄂尔多斯盆地上三叠统构造单元与野外剖面位置图
Fig.1 Upper Triassic Tectonic units and field profile position, Ordos Basin

造,属于浅水环境下产物(见图4)。

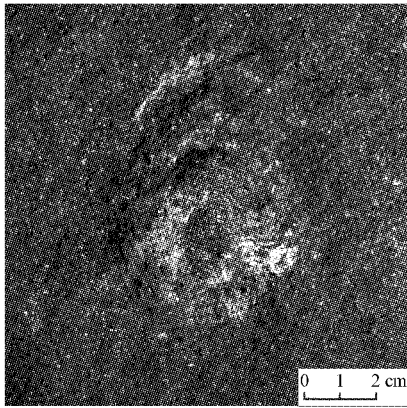


图3 垂直觅食迹(延河剖面,长9)

Fig.3 Vertical browsing trace(Yanhe profile, Ch 9)

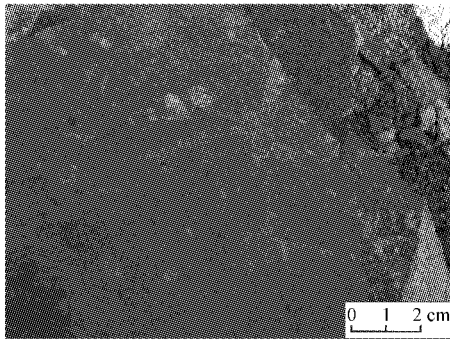


图4 U形管迹(薛峰川剖面,长9)

Fig.4 U-tube trace(Xuefengchuan profile, Ch 9)

(4)潜穴迹

以 *Planolites*、*Chondrites* 和 *Teichichnus* 为代表,发育特征为个体微小的觅食形潜穴,具回填构造。*Teichichnus* 除进食外还有居住的功能。虽然 *Planolites* 可与 *Skolithos* 共生,但发现的类型主要见于浅湖较深部位或浪基面以下的缺氧环境(见图5)。

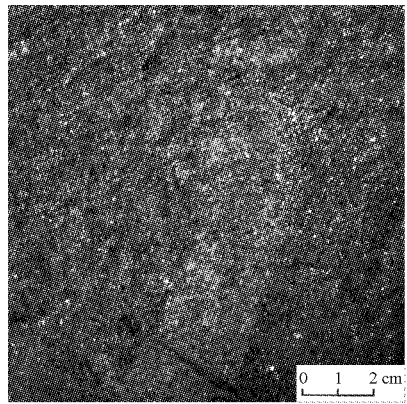


图5 潜穴迹(庄42井,长7₂)

Fig.5 Burrow trace(Zhuang 42 well, Ch 7₂)

(5)水平迹

以 *Protopaleodictyon* 为代表,属底栖生物在泥

质基底上沿层面觅食爬行留下的遗迹,主要代表半深-深湖或浊流沉积的远端缺氧环境下的遗迹类型,有网状、线型的形态(见图6)。

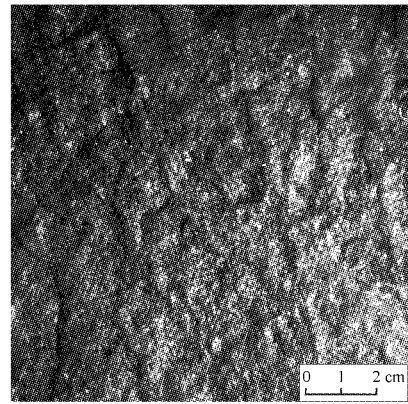


图6 网状水平迹(庄42井,1861.45 m,长7)

Fig.6 Reticular horizontal trace (Zhuang 42 well, 1861.45 m, Ch 7)

(6)逃逸迹

动物在任何突发事件影响下逃离不利的生存环境而留下的遗迹,主要特征是:缺乏长久居住迹或觅食迹的衬里;缺乏回填构造或蹼状构造;多数为垂直的上下通道,但由于逃避难以控制方向,有些逃逸在方向上有所改变或搬动;在层理地层中,逃逸两侧地层向下或向上弯曲,属于半深水环境(见图7)。

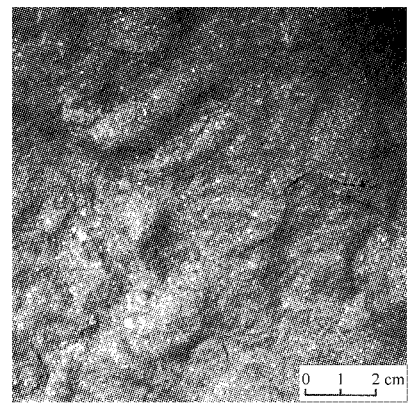


图7 水平状逃逸迹(耀县柳林镇,长9)

Fig.7 Horizontal escape track (Liulin town in Yaoxian County, Ch 9)

(7)鱼类游泳迹

游泳生物(鱼类)沿水体底面游动所留下的遗迹,一般表现为湖泊深水泥质底部保存,在延长组较深水中也有发现(见图8)。

(8)植物根迹

植物根迹大量发育是陆相遗迹化石的一大特色。不同的环境背景有不同类型的根迹,但是岩芯或局部露头显示的这些根迹,大多是仅存植物根系的

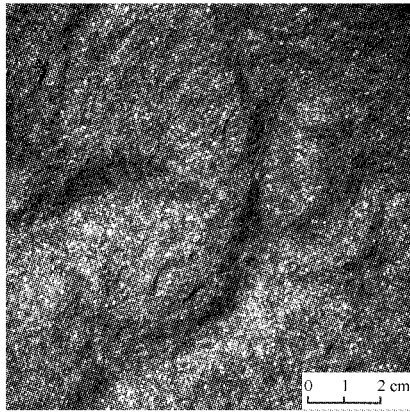


图 8 深水环境下的游泳迹(正 6 井,长 7)

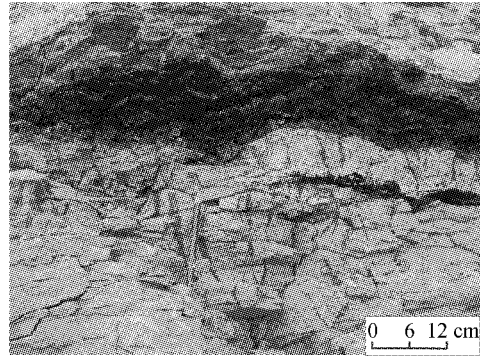
Fig.8 Nekton trace under deep-water environment
(Zheng 6 well, Ch 7)

图 9 沼泽环境下的植物根迹(延河剖面,长 1)

Fig.9 Root trace of plant in swampy environment
(Yanhe profile, Ch 1)

一部分。目前延长组所发现的古根迹大致分 5 类:①直根迹,即有一明显粗大的主根,侧根逐渐分叉;②辐射状根迹,无明显主根,但有一定数量的初生根由基部向四周延伸;③须根迹,无明显主侧根之分,根系的次级分叉不发育;④水平根迹,根迹细,呈水平状延伸;⑤根模或根塑模,即根顶部被氧化,保留根核,主要发育于三角洲平原相的洪泛平原沼泽(见图 9)。

表 1 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组遗迹化石组合、分布及沉积环境

Tab.1 Fossil assemblage, distribution and sedimentary environment of the Late Triassic in Yanchang Formation, Ordos Basin

遗迹组合	主要属或类型	遗迹化石性质	分布及沉积环境
<i>Scoyenia</i> 遗迹组合	<i>Scoyenia graoilis</i> (纤细斯柯菌迹) <i>Scoyenia ichnos</i> p(斯柯菌迹未定种)	以具有回填构造的觅食潜穴十分发育为特征,遗迹个体较大	河流泛滥平原、三角洲平原洼地最常见软质基底
<i>Skolithos</i> 遗迹组合	<i>Skolithos verticalis</i> (垂直石针迹) <i>Skolithos ichnos</i> p(石针迹未定种) <i>Cylindricum ichnos</i> p(圆锥迹未定种)	以个体大的垂直管状居住迹大量发育为特征,遗迹组合分异度小,丰度高	软底或半固化砂底的滨浅湖及其高能浅水、三角洲分流河道及水下分流河道边部
<i>Arenicolites</i> 遗迹组合	<i>Arenicolites ichnos</i> p(沙蠕迹未定种) <i>Ancorichnus coronus</i> (弯曲锚形迹) <i>Skolithos ichnos</i> p(石针迹未定种)	以 U 形等不同形态的居住迹为主要特征,含少量觅食迹化石,分异度较高	浅湖上部、湖湾、三角洲河口坝沉积环境,具有氧气条件、水流能量较低或中等的软质基底环境
<i>Planolites</i> 遗迹组合	<i>Planolites ichnos</i> p(漫游迹未定种) <i>Teichichnus</i> (墙形迹) <i>Chondrites ichnos</i> p(从藻迹未定种)	以个体微小的觅食型潜穴发育为特征,具有回填构造	浅湖较深部位、三角洲前缘末端
<i>Protospaleodictyon</i> 遗迹组合	<i>Protospaleodictyon ichnos</i> p(始古网迹未定种) <i>Paleodictyon ichnos</i> p(古网迹未定种) <i>Gordia ichnos</i> p(线形迹未定种)	保存在岩层表面上的觅食迹、牧食迹和爬行迹为主	深-半深湖,以浊流沉积层远端最发育
鱼类游泳迹	游泳迹	深水鱼类游泳迹	深-半深湖环境
	直根迹或根模	以根系发达、分叉次数较多的直根迹为主	洪泛平原上潜水面稍低处,较高地形带的河道边部,决口扇近端部
<i>Rhizoliths</i> 遗迹组合	须根迹 水平根迹 垂直居住迹	主要发育须根迹、水平状根迹、单根迹,并常有动物遗迹与之共生	潜水面较高的低地、泥质基底、三角洲平原洼地、河道间沼泽等

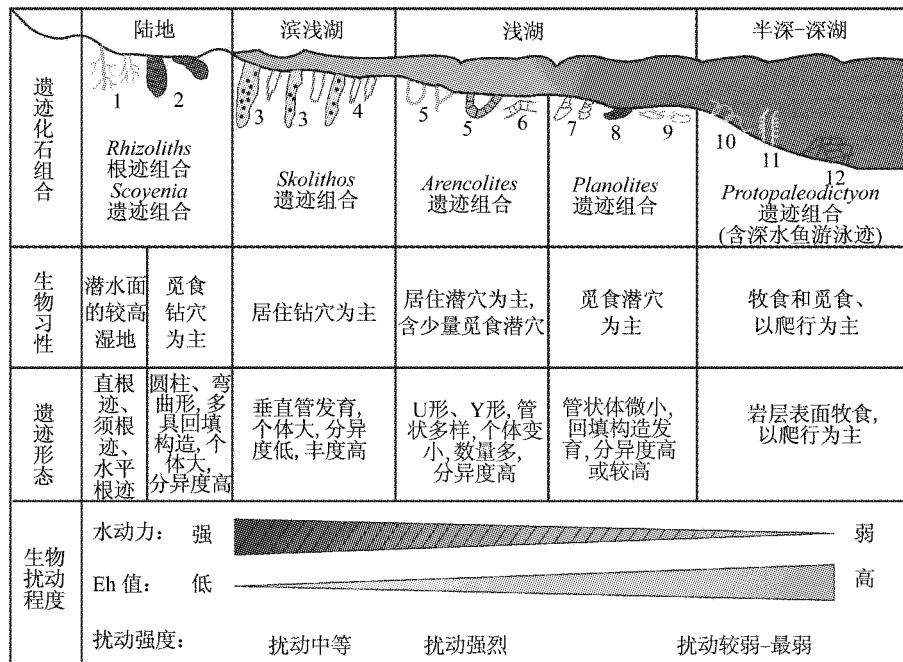
3 遗迹化石组合与古环境的判别

基于各种遗迹化石组合、生物习性、遗迹化石形态与特定环境的对应关系^[15-16],建立了鄂尔多斯盆地延长组遗迹化石组合分布与古湖泊环境对应模式

2 遗迹化石组合与沉积环境

根据盆地 6 条剖面露头和近 100 口井岩芯遗迹化石的统计与分析,并结合遗迹化石的几何形态特征、分布特征及围岩的沉积条件,归纳出鄂尔多斯盆地延长组遗迹化石组合与成因相或沉积相组合的对应关系(如表 1 所示)。

(见图 10)。通过其他相标志、动植物实体化石组合特征,并结合现代生物遗迹生态,对该盆地晚三叠世古湖泊环境作出判断,展示出用遗迹化石组合恢复鄂尔多斯盆地延长组岩相古地理与古湖盆生态环境的新途径。



1-Rhizololiths(根迹);2-Scoyenia(斯柯菌迹);3-Cylindricum(柱形迹);4-Skolithos(石针迹);5-Arenicolites(沙蝎迹);6-Ancorichnus(锚形迹);7-Teichichnus(墙形迹);8-Planolites(漫游迹);9-Chondrites(丛藻迹);10-Gordia(线状迹);11-鱼游迹;12-Protopaleodictyon(始古网迹)

图 10 鄂尔多斯盆地延长组遗迹化石组合分布与古湖泊环境恢复模式

Fig.10 Distribution of trace fossil assemblages and restoration of ancient lake environment in Yanchang Formation, Ordos Basin

4 结语

鄂尔多斯盆地在晚三叠世时期发育水体广阔的淡水湖盆,气候温暖潮湿。晚三叠世延长组地层中发育有丰富的古生物遗迹化石,从湖盆边缘的洪泛平原沼泽相发育的植物根迹,到湖盆浅水高能环境下发育的垂直觅食迹、垂直居住迹、U型管迹,浅水低能条件下发育的潜穴迹、水平迹以及半深水环境下的逃逸迹、深水环境的游泳迹。延长组地层的沉积水体由浅到深的变化上发育有不同的古生物遗迹化石组合系列,这对恢复鄂尔多斯晚三叠世延长期湖盆岩相古地理、古环境具有重要的地质意义和应用价值。

参考文献:

[1] 杨明慧,刘池洋,曾鹏,等. 华北克拉通晚三叠世沉积盆地原型与破坏早期构造变形格局[J]. 地质论评, 2012, 58(1):1. YANG Minghui, LIU Chiyang, ZENG Peng, et al. Prototypes of Late Triassic sedimentary basins of North China Craton (NCC) and deformation pattern of its early destruction[J]. Geological Review, 2012, 58(1):1.

[2] 陕西省地质矿产局. 陕西省区域地质矿产志[M]. 北京:地质出版社,1989.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province. Region geology and mineral resources of Shaanxi Province[M]. Beijing: Geology Press, 1989.

[3] 杨华,傅强,付金华. 鄂尔多斯晚三叠世盆地沉积层序与油气成藏[M]. 北京:地质出版社,2007. YANG Hua, FU Qiang, FU Jinhua. Sedimentary sequence and oil & gas accumulation in Late Triassic Ordos Basin [M]. Beijing: Geology Press, 2007.

[4] 杨华,傅强,齐亚林,等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长期古湖盆生物相带划分及地质意义[J]. 沉积学报,2016(4):688. YANG Hua, FU Qiang, QI Yalin, et al. The paleontology phase zones and its geological significance on the Late Triassic Yanchang Stage Palaeo-lacustrine Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016(4):688.

[5] 杨式溥. 遗迹相及其古环境的意义[J]. 地球科学, 1986, 11(5):455. YANG Shifu. Ichnofacies and their paleoenvironmental significance[J]. Earth Science, 1986, 11(5): 455.

[6] 方少仙,侯方浩,孙逢育,等. 百色盆地田东拗陷第三系砂岩成岩作用与孔隙演化研究[J]. 天然气工业,1993,13(1):32. FANG Shaoxian, HOU Fanghao, SUN Fengyu, et al. Study on diagenesis and pore evolution of Tertiary system sandstone of Baise Tiandong depression basin [J]. Natural Gas Industry, 1993, 13(1): 32.

[7] 赵澄林. 油区岩相古地理[M]. 北京:石油大学出版社,2001. ZHAO Chenglin. Lithofacies and paleogeography in petroliferous area[M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 2001.

[8] 王丽芳,卢宗盛,龚道好,等. 陕北横山晚三叠世造迹鱼类恢复[J]. 地球科学,2008,33(1):12. WANG Lifang, LU Zongsheng, GONG Daohao, et al.

- Restoration of Late Triassic fish trace makers in Hengshan County, Shaanxi Province, China [J]. *Earth Science*, 2008, 33(1):12.
- [9] 刘冠邦,朱兆信,张兴良,等. 记甘肃华池的一件空棘鱼类化石[J]. *高校地质学报*, 1999, 5(4): 474.
LIU Guanbang, ZHU Zhaoxin, ZHANG Xingliang, *et al.* A *Coelacanth* fossil from Huachi area, Gansu Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5(4): 474.
- [10] 苏德造. 记陕北子长晚三叠世一新的古鲑类[J]. *古脊椎动物学报*, 1999, 37(4):25.
SU Dezao. A new Palaeoniscoid fish from the upper Triassic of Zichang, Northern Shaanxi [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1999, 37(4):25.
- [11] 苏德造,袁效奇,邓胜徽. 古背鳍(Palaeoniscinotus)在我国初次发现[J]. *古脊椎动物学报*, 1997, 35(3):161.
SU Dezao, YUAN Xiaoqi, DENG Shenghui. Discovery of Palaeoniscinotus in China [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1997, 35(3):161.
- [12] 刘宪亭, 苏德造. 山西榆社盆地上新世鱼类[J]. *古脊椎动物与古人类*, 1962, 6(1):1.
LIU Xianting, SU Dezao. Pliocene fishes from Yushe Basin Shaanxi [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1962, 6(1):1.
- [13] 冯胜斌,袁效奇,贺静,等. 鄂尔多斯盆地西缘石沟驿地区晚三叠世沉积构造环境及其地质意义[J]. *世界地质*, 2008, 27(4):378.
FENG Shengbin, YUAN Xiaoqi, HE Jing, *et al.* Geological environment of Upper Triassic sediment in Shigouyi region of western Ordos Basin and its geological significance [J]. *Global Geology*, 2008, 27(4):378.
- [14] 傅强,孙喜天,刘永斗. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆特征恢复及地质意义[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(11):1537.
FU Qiang, SUN Xitian, LIU Yongdou. Geologic significance and re-establishment of basin character in Late Triassic of Ordos Basin [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2009, 37(11):1537.
- [15] SEILACHER A. Biomats, biofilms, and bioglue as preservational agents for arthropod trackways [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 270(3/4): 252.
- [16] LEHANE J R, EKDALE A A. Pitfalls, traps, and webs in ichnology: traces and trace fossils of an understudied behavioral strategy [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 375(1): 59.

(上接第 686 页)

参考文献:

- [1] BATUWITAGE C, FAWZIA S, THANBIRATNAM D, *et al.* Durability of CFRP strengthened steel plate double-strap joints in accelerated corrosion environments [J]. *Composite Structures*, 2017, 160: 1287.
- [2] REN Junjie, LI Kezhi, ZHANG Shouyang, *et al.* Preparation of carbon/carbon composite by pyrolysis of ethanol and methane [J]. *Materials & Design*, 2015, 65: 174.
- [3] 余海燕,徐豪,周辰晓. 大学生方程式赛车复合材料单体壳车身优化[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(11): 1729.
YU Haiyan, XU Hao, ZHOU Chenxiao. Optimization of carbon fiber composite monocoque car body for formula society of automotive engineers [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(11):1729.
- [4] 郭小农,王奔,蒋首超,等. 碳纤维布加固铝合金连接试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3):371.
GUO Xiaonong, WANG Ben, JIANG Shouchao, *et al.* Experimental study of aluminum alloy plates strengthened with CFRP sheets [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(3):371.
- [5] LI Gang, CHEN Jihua, YANISHEVSKY M, *et al.* Static strength of a composite butt joint configuration with different attachments [J]. *Composite Structures*, 2012, 94: 1736.
- [6] 张岐良,曹增强. 复合材料螺栓性能的影响因素研究[J]. *航空学报*, 2012, 33(4):755.
ZHANG Qiliang, CAO Zengqiang. Study on factors influencing the performance of composite bolted connections [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(4): 755.
- [7] CHISHTI M, WANG C H, THOMSON R S, *et al.* Experimental investigation of damage progression and strength of countersunk composite joints [J]. *Composite Structures*, 2012, 94: 865.
- [8] WANG H S, HUNG C L, CHANG F K. Bearing failure of bolted composite joints, Part I: experimental characterization [J]. *Journal of Composite Materials*, 1996, 30(12):1284.
- [9] ZHAI Y, LI D, LI X, *et al.* An experimental study on the effect of bolt-hole clearance and bolt torque on single-lap, countersunk composite joints [J]. *Composite Structures*, 2015, 127:411.
- [10] AKTAS A. Bearing strength of carbon epoxy laminates under static and dynamic loading [J]. *Composite Structures*, 2005, 67:485.
- [11] 吕霞,周储伟. 钉/孔摩擦对复合材料机械连接强度的影响研究[J]. *机械制造与自动化*, 2015, 44(3):36.
LÜ Xia, ZHOU Chuwei. Research on effect of friction on strength of composite laminate in bolt joint [J]. *Machine Building & Automation*, 2015, 44(3):36.
- [12] SALEEM M, ZITOUNE R, EL SAWI H, *et al.* Role of the surface quality on the mechanical behavior of CFRP bolted composite joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 80(1):246.
- [13] KOLESNIKOV B, HERBECK L, FINK A. CFRP/ titanium hybrid material for improving composite bolted joints [J]. *Composite Structures*, 2008, 83:368.
- [14] MORI K, AKITA K, ABE Y. Spring back behavior in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47(2):321.
- [15] 王宏雁,高卫民,潘玲玲,等. 轻质结构发动机罩设计研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(8):1098.
WANG Hongyan, GAO Weimin, PAN Lingling, *et al.* Lightweight structure of engine hood [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2006, 34(8):1098.
- [16] ASTM. ASTM D5961/D5961M-13 Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2013.