

· 基础地质 ·

陕西靖边龙洲丹霞白垩纪恐龙足迹沉积环境

唐永忠¹, 邢立达², 李兴文¹, 吴昊¹, 李益朝¹, 党晨¹, 王董浩²

TANG Yongzhong¹, XING Lida², LI Xingwen¹, WU Hao¹, LI Yizhao¹, DANG Chen¹,
WANG Donghao²

1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:2019年在陕西靖边龙洲下白垩统洛河组紫红色砒砂岩中发现多处恐龙足迹, 实属罕见。含恐龙足迹地层岩石组合为一套典型沙漠相“红色砒砂岩”系, 岩石组合以紫红色-暗紫红色薄层中-粗粒长石石英砂岩、石英砂岩夹灰黄色-浅紫红色块状粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主。发现识别出恐龙足迹行迹9处。根据足迹形态对比, 推断其类型为兽脚类恐龙足迹。根据足迹产地地层剖面的研究, 推断恐龙足迹分布在沙丘湖岸附近。本次发现的恐龙足迹与2017年在陕西神木中鸡发现的恐龙足迹差异明显, 为陕北鄂尔多斯盆地恐龙研究提供了珍贵的研究资料。由于靖边龙洲丹霞地貌恐龙足迹产地的地层研究程度较低, 因此, 对恐龙足迹的研究在地层年代确定, 特别是恢复岩相古环境具有重大意义。

关键词:龙洲丹霞; 恐龙足迹; 沙漠相; 沉积环境; 白垩纪

中图分类号:P534.53; Q915 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)04-0425-08

Tang Y Z, Xing L D, Li X W, Wu H, Li Y Z, Dang C, Wang D H. The sedimentary environment of Early Cretaceous dinosaur tracks in Longzhou Danxia Landform of Jingbian County, Shaanxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(4): 425-432

Abstract: During the extensive survey on Longzhou Danxia Landform in Jingbian County of Northern Shaanxi in July 2019, Shaanxi Institute of Geological Survey found several dinosaur track sites in the purple sandstone of Early Cretaceous Luohe Formation. The dinosaur track-bearing formation belongs to a typical red arsenic sandstone of desert facies, which is mainly composed of purplish red to dark purplish red medium to coarse grained feldspathic quartz sandstone, and quartz sandstone intercalated with grayish yellow-pale purple red massive silty mudstone and argillaceous stone, constituting the typical Danxia Landform scene. Altogether 9 dinosaur trackway sites were identified. Based on the comparison of morphological features and the field survey, it can be inferred that the dinosaur trackmakers were theropod. Based on the research on the sequence of around this area, it can be inferred that these dinosaur tracks were preserved near the shoreside of a desert lake. The dinosaur tracks found in Jingbian are distinctly different from those found in Zhongji Town, Shenmu City in 2017 and can provide rare research materials for the dinosaur research in the Ordos Basin. Moreover, the dinosaur track-bearing formation is less well studied, thus the study of the dinosaur tracks will contribute greatly to ascertaining the stratigraphic age and reconstructing the paleoenvironment.

Key words: Longzhou Danxia Landform; dinosaur tracks; desert facies; sedimentary environment; Cretaceous

2017年, 陕西省地质调查中心在实施“关中-天水经济区综合地质调查——陕北丹霞地貌地质遗

迹调查项目”过程中, 在陕北神木市中鸡镇北东约6 km发现一处丹霞地貌景观遗迹。后期, 在开展

收稿日期: 2019-10-30; 修订日期: 2020-03-01

资助项目: 陕西省公益性地质调查项目《陕北丹霞地貌地质遗迹调查项目》(编号: 公益[2017]02-07) 和《陕西靖边龙洲丹霞地貌详查项目》(编号: 20180201)

作者简介: 唐永忠(1965-), 男, 教授级高级工程师, 从事矿产勘查、沉积盆地与地质遗迹研究。E-mail: 625879916@qq.com

“神木市公格沟丹霞地质公园申报项目”野外调查中,在白垩系紫红色砂岩中发现 5 处恐龙、四足动物足迹化石,恐龙行迹为原始保存状态,足迹保存完好,行迹清晰,呈现十分良好的自然属性与可保护性^[1-2]。2019 年 6—9 月,在陕西省靖边县龙洲镇洛河组紫红色砂岩中发现兽脚类恐龙足迹,9 组恐龙行迹保存完整清晰,引起国内媒体广泛报道关注(图 1)。此次发现与前人在神木市栏杆堡镇发现的侏罗纪恐龙足迹^[3]和中鸡镇白垩纪恐龙足迹^[1-2]的层位、形态组合明显不同,在陕北丹霞沙漠相沉积环境首次发现恐龙足迹实属罕见,因此在恐龙足迹与岩相古环境研究方面,具有重要科学意义。

1 地质构造背景

陕西靖边地处鄂尔多斯盆地中南部,作为一个相对稳定的地块,与鄂尔多斯盆地一起发展和演化。鄂尔多斯地区属于多时期、多阶段、不同类型盆地的叠合盆地。

鄂尔多斯地区位于华北克拉通西缘,奠基于太古宇和古元古界基底之上,盆地内区域拗陷复合、地质构造平缓,缺少背斜与断层,总体上呈东部翘起向西部倾伏的区域性斜坡。沉积盖层时代较全,仅缺失志留系、泥盆系及下石炭统,平均沉积岩厚

度为 5000 m。其中,中、新元古界以海相、陆相沉积和火山喷出岩为主,厚度 200~3000 m;下古生界以海相碳酸盐岩为主,在盆地东部还有厚达 314.8 m 的岩盐、石膏沉积,总厚度 400~1600 m;上古生界由局限海相沉积向陆相河流沼泽沉积过渡,厚度 600~1700 m;中生界为内陆湖泊、沼泽、河流相沉积,厚度 2500~3000 m;新生界,古气候由湿热转向干旱,构造由沉降转为隆升,沉积厚度不足 300 m。根据地质构造特征,将盆地划分为 5 个演化阶段:盆地基底形成与演化阶段、中新元古代—早古生代克拉通演化阶段、中晚奥陶世隆起构造演化阶段、晚古生代构造分异演化阶段和中新生代内陆湖盆演化阶段。

早古生代,鄂尔多斯盆地主体进入稳定克拉通发展阶段,盆地内部表现为缓慢构造沉降,盆地东北地区接受来自于华北海的沉积,而西缘和南缘地区经历了较强的沉降,表现为快速沉降特征,接受来自西部和南部祁连海和秦岭海沉积。晚古生代石炭纪,总体表现为西部断陷沉降带、中部隆起带和东部浅拗带的格局。从晚石炭世晚期到早二叠世早期,盆地西部断陷沉降带被含煤的海湾—前三角洲—三角洲平原沉积序列依次充填,盆地中央古隆起因为周缘海侵而逐渐被掩埋。中生代鄂尔多斯地区在古生代盆地大华北盆地的基础上形成,也是真正意义的独立鄂尔多斯陆相盆地的演化阶段。盆地内部分异明显,具有周缘活动强烈、沉积与沉降中心分离、沉积厚度横向变化大、不同部位构造活动差异明显的特点;盆地东部逐渐隆升并使沉积与沉降中心向西部迁移。盆地经历了印支期改造及残存克拉通内叠合盆地的发育、燕山期改造及陆内拗陷盆地的发育等演化阶段。早、中三叠世逐渐转化为大型内陆差异沉降盆地,形成了以河流三角洲—湖泊沉积体系为主的巨厚陆相沉积,沉积中心呈“L”形展布于盆地南部。晚三叠世末的印支运动使华北地区整体抬升,鄂尔多斯地区古地形西高东低。进入侏罗纪,盆地渐趋平原化,气候转向温暖潮湿,植被茂密,湖泊沼泽密布,盆地充填以冲积扇—辫状河相为主,广泛发育湖沼煤系地层。

燕山期,鄂尔多斯盆地边部形成了银川、河套、汾渭等小型断陷盆地,盆地主体以差异抬升为主。白垩纪盆地主要为沙漠相沉积环境,沿南北向断裂

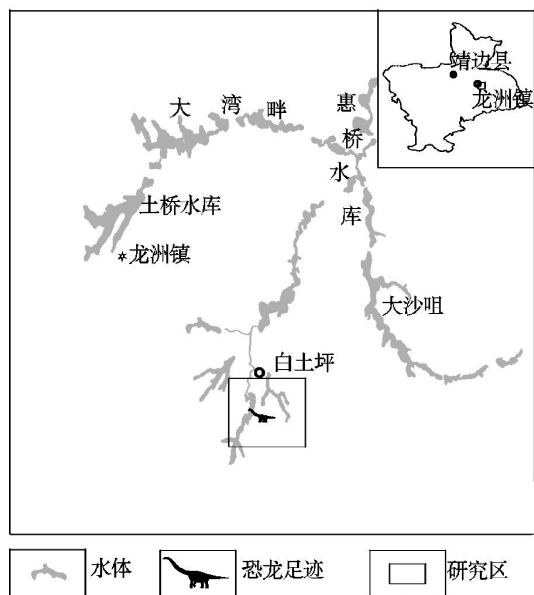


图 1 靖边龙洲恐龙足迹地理位置

Fig. 1 Geographical location of dinosaur tracks in Longzhou Town, Jingbian County

鄂尔多斯—榆林一线为沙漠—冲积扇。晚新生代受南西方向的挤压,盆地的抬升方向及接受沉积范围和古构造面貌有很大的改变,上新世在局部地区发育三趾马红土。新生代以来,盆地本体相继隆升,盆地周边相继断陷形成一系列地堑,形成了鄂尔多斯盆地现今的地质面貌。

2 研究区沉积地质特征

2.1 地层岩性特征

白垩系志丹群洛河组为一套紫红、灰紫红色粗—中细粒长石砂岩、石英砂岩、岩屑长石石英砂岩,局部夹泥岩,总体为一套风成沙漠相沉积,局部存在丘前洼地沉积。通过沉积构造、层理类型、粒度分布、沉积层序、沉积作用方式等研究,结合矿物成分和显微结构及石英颗粒 SEM 表面结构特征的研究^[4],这套紫红色砂岩具有如下特征:①发育典型的大型风成交错层理;②粒度均匀,分选性好,以中—细砂、极细砂组为主,缺乏粉砂—粘土颗粒组分;③砧砂岩以颗粒接触,缺乏胶结物,且岩石结构疏松;④石英颗粒磨圆度好,表面发育碟形和新月形坑、溶蚀坑、硅质薄膜等风成砂颗粒具有的独特表面特征。据此得出,这套紫红色砂岩是典型的沙漠相沉积的新认识。

洛河组岩石类型主要有砾岩、粗砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩等。砾岩分布局限,多呈透镜体产出,不成层,常见于分流河道及冲积扇砂体的底部。砂岩主要有石英砂岩、石英长石砂岩、石英杂砂岩、长石砂岩、岩屑长石砂岩、钙质岩屑长石砂岩、长石杂砂岩等。粉砂岩为岩屑长石粉砂岩、钙质含砂屑长石粉砂岩、泥质岩屑长石粉砂岩、黑云母长石粉砂岩等。泥质岩常见泥岩、粉砂质泥岩、炭质泥岩等。区域上洛河组总厚度一般 71~348 m,调查区仅出露上部地层,厚度小于 200 m。

2.2 岩石特征

陕北丹霞洛河组岩性为灰褐色、红褐色中细粒长石石英砂岩、长石砂岩、岩屑长石砂岩等,主要矿物成分为石英(40%~45%)、斜长石(10%~15%)、钾长石(10%~20%)、岩屑(20%~30%)等,而沙丘砂岩石英一般占 85%~90%,长石及岩屑占 10%~15%,从盆地中心到沙漠边缘,石英颗粒减少,岩屑增多,分选中等,磨圆为次圆状,胶结物为硅质、钙

质、铁质,孔隙式胶结(图 2),细粒—中粒砂状结构,薄—中厚层构造。

洛河组砂岩以细—中粒为主(粒度 0.14~0.23 mm),分选较好—好(分选系数 0.9~1.16),砂粒以悬浮与跳跃段为主,缺乏河流沉积粗尾滚动段。岩石结构疏松,胶结性差。砂粒表面有泥质薄膜和大量上翻晶面薄片,较粗颗粒在强风暴作用下砂粒相互磨蚀撞击形成碟形浅坑,加上巨大的交错层理,这一系列特征均表明洛河组砂岩形成于沙漠相沙丘沉积环境。

2.3 沉积构造与岩相特征

靖边龙洲的洛河组砂岩中发育大型板状交错层理和中—大型槽状交错层理。板状交错层层厚为 1.5~16 m,个别巨厚者可达 38 m,其砂纹层倾角多上陡下缓,一般 25°~29°,高者可达 35°,前积层下部倾角变缓 5°~12°,常与下界面呈相切关系(图 3-a)。大型板状交错层理横向延伸稳定,达十余米至 100m 以上,说明当时沙丘形成时受稳定的单向风力作用,且沉积区地势平坦、地下水面平稳,与风力吹蚀作用相结合,削切出平直的平板形的交错层。层理产状较稳定,产状变化在 145°~210°∠3°~5°之间,集中于 110°~160°∠15°~25°之间,个别倾角可达 40°,产状也较稳定。层理面不平整,多为对下伏地层的—个侵蚀面;层内纹层极发育,构成正(逆)粒序韵律。

中—大型的槽状交错层(图 3-b)和楔状交错层在调查区有少量出现,代表该处(或该层位)沉积时风向多变、且当时潜水面极低,水平削切面不发育,从而让新的沙丘能在未能削切的老沙丘的斜坡上爬升,形成了这种纹层产状多变的交错层理,层理产状近水平或向南西缓倾,倾角小于 10°,层内纹层发育,产状变化较多。

从岩性特征、大型斜层理等特征分析,洛河组主要沉积环境为半干旱气候条件下的一套沙漠相沙丘亚相、丘间亚相^[4-5]。沙丘是白垩纪最典型的主要且易识别的沙漠相沉积环境。区域上沙漠沉积中心在陕西的志丹、吴起一带,沉积厚度为 200~380 m,剖面上表现为多个沙丘相互叠置,交错层理、板状层理极发育,岩石结构疏松,孔隙性较好,主要为石英长石砂岩,是黄土高原区重要的含水层之一。

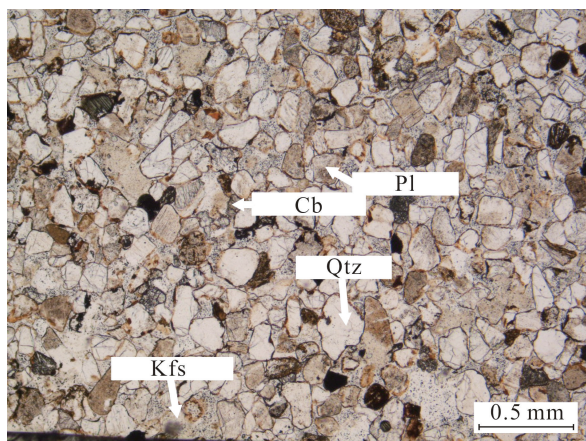


图2 靖边龙洲洛河组砂岩显微特征

Fig. 2 Microscopic features of sandstone of Luohe Formation in Longzhou Town, Jingbian County
Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Cb—碳酸盐矿物

3 研究区沙漠相划分及沉积特征

3.1 沙漠相划分

沙漠相是鄂尔多斯盆地早白垩世最具特色的沉积相类型,前人对沙漠相进行了初步划分,但不够系统且缺乏识别标志^[4-6]。沙漠相沉积环境可初步划分为戈壁、旱谷、沙丘、丘间、沙漠湖等风成沉积5个亚相与7个微相(表1)。

3.2 沙漠相沉积特征

3.2.1 戈壁亚相

戈壁亚相主要由风力从冲洪积沉积物中搬运走细粒沉积,而留下的次棱角-次磨圆细砾、卵石、粗砂组成,一般分布在盆地沙漠边缘。砾石层分选差,平面延伸稳定,表面平坦状,厚度几厘米-几十

厘米,侧向延伸远,有时发育缓倾斜大型波浪层,砾石表面常发育沙漠漆膜,形成风凌石。在鄂尔多斯盆地东北部东胜、神木中鸡可见。

3.2.2 旱谷亚相

旱谷亚相包括旱谷、沙漠平原微相。旱谷主要为干旱环境突发间歇性水道形成的含砾粗砂岩沉积;沙漠平原由灰黄色石英细-粉砂岩构成,发育在旱谷或戈壁滩上。岩石粒度细,由风成细砂、粉砂大面积构成厚度较薄的低角度斜层理及水平层理细粒沉积组成。平面上,从盆地边缘冲洪积扇、旱谷扇,直到沙漠沉积的旱谷水道、小型沙丘演变。垂向上,可与冲积扇、丘间、沙丘沉积叠置。

沙漠边缘旱谷沉积粒度粗,厚度大;沙漠平原则粒度细,厚度薄,胶结疏松,水平层理发育,但缺乏水流作用。

3.2.3 沙丘亚相

沙丘是白垩纪最主要、最典型的沙漠沉积类型,可分为小型沙丘、大型沙丘微相。

沙丘砂岩主要呈紫红色、棕红色,颜色艳丽,多形成于干旱、炎热沉积环境。岩石成分以石英为主,含量占85%~90%,含少量长石,云母、粘土很少,因此岩石成分纯净,以细-中粒为主,分选较好-好,砂粒以悬浮与跳跃段为主,岩石结构疏松,胶结性差。砂粒磨圆度好,有较多蝶形凹坑、上翻晶片及毛玻璃化,这些都是沙丘砂岩的重要微观判别标志^①。沙丘砂岩发育大中型交错层理、平行层理为特征,大中型交错层理是洛河组、罗汉洞组最典型的沉积构造,规模大,类型多,风向变化大,交错层上部倾角陡,前积层下缓,与下部岩层多呈水平截切。前积纹层厚1~5 cm,单斜层厚度从十几厘米到

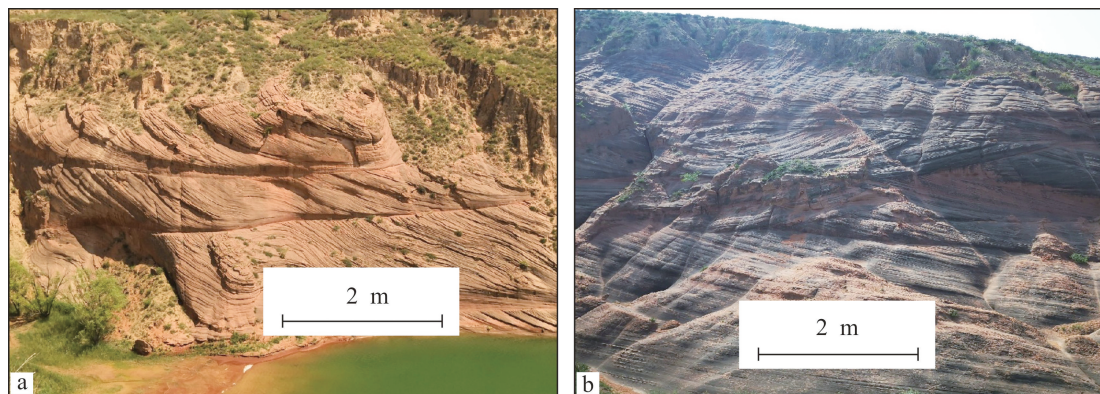


图3 板状交错层理(a)和槽状交错层理(b)

Fig. 3 Tabular cross-bedding(a) and trough cross-bedding(b)

表 1 鄂尔多斯盆地沙漠相亚相划分
Table 1 Classification of subfacies of desert facies in the Ordos Basin

沉积相	沉积亚(微)相		地质营力	沉积构造及粒度	发育情况
沙漠相		戈壁亚相	风力为主	平行层理、沙丘;粗砂、砾石	少见
	旱谷亚相	旱谷	水力为主	块状、斜层理;粗砂、细砾	常见
		沙漠平原	风力为主	水平层理;细砂、粉砂	常见
	沙丘亚相	小型沙丘	风、水交错	小型沙丘、斜层理;细、粉砂	广泛
		大型沙丘	风力为主	大型板状、交错层;细、粗砂	广泛
	丘间亚相	干丘间	风、水交错	大型交错层;细、粗砂	广泛
		湿丘间	水力为主	小型沙丘、平行层理;细粉砂	常见
		沙漠湖亚相	水力为主	水平层理;细砂、粉砂、泥	常见

2~5 m 不等,侧向延伸数十米到数百米。风力强弱与持续时间长短,往往决定沙丘的发育高度及沙丘厚度,风向决定沙丘的层理类型,长时间强风力往往形成大型-巨型沙丘,如志丹洛河一带沙丘厚度巨大,延伸稳定,沙丘砂岩单层层系厚度数米至十余米,横向构成砂垅或砂链,延伸几百米甚至几千米。

3.2.4 丘间亚相

丘间亚相是沙丘之间形成的一系列短时平坦洼地,因暂时性水流而形成细粒碎屑岩沉积,常伴随着沙丘出现。丘间沉积可分为干丘间、湿丘间,主要取决于降雨或地下潜水位。干丘间往往因风沙吹蚀被填满夷平,形成沙漠平原。湿丘间一般因季节性降雨或地下潜水位抬升,形成紫红色粉砂岩、粉砂质泥岩沉积,可见水平层理。往往因水浅干涸,发育泥裂、雨(雹痕)痕、生物虫迹等。泥裂缝往往被砂充填,形成砂柱这一特殊沉积现象,厚度几厘米至数米,分布局限且不稳定。

3.2.5 沙漠湖亚相

沙漠湖亚相是因为构造或风蚀作用,在季节性降雨或地下潜水位抬升时,沙丘洼地之间形成的小型浅水湖泊。常与大中型沙丘相伴随,侧向上构造缓慢下降可扩展为大型湖泊,构造抬升或风蚀充填,沙漠湖变小或消失;垂向上与沙丘或旱区过渡,多形成紫红色泥岩、粉砂质泥岩沉积,常见小型沙丘沉积,发育水平层理、小型沙纹层理。当沙漠湖边缘与河流连通时,有较多的砂泥质沉积与动植物碎片,同时伴随冲洪积扇沉积;当气候

持续干旱时,沙漠湖逐渐蒸发干涸成盐湖及盐碱滩,局部形成石膏、岩盐沉积。陕西靖边一带沙漠湖发育且典型,由淡紫红色薄层泥岩、粉砂岩夹细砂岩构成,普遍发育钙质薄层,发育水平层理、小型沙纹层理,沉积厚度几十厘米到十余米不等,侧向与垂向上均呈透镜状或似层状,分布普遍但不稳定。沙漠湖沉积因粒度细、颜色浅,水平层理发育,横向上多呈透镜状分布,野外与沙丘砂岩易于识别区分。

4 恐龙足迹地层特征

陕西靖边龙洲恐龙足迹分布于龙洲镇白土坪,发现的 9 组恐龙行迹分布在洛河组紫红色砂岩上;以连续凹型的形式出现,有 5 组行迹较长,保存完整且清晰;其中一组足迹保留有较清晰的趾痕。

4.1 恐龙足迹地层及岩石组合

恐龙足迹产出的剖面岩性记录如下。

8~9.上覆地层:第四纪全新世风成沙、黄土层

厚度大于 1.50 m

~~~~~不整合~~~~~

早白垩世洛河组(K<sub>1</sub>l)

厚度大于 8.30 m

7.浅紫红色薄层状泥质粉砂岩,水平层理发育 4.40 m

6.紫红色薄层中粒长石石英砂岩,发育斜层理 0.20 m

5.浅紫红色薄层细粒泥质粉砂岩,水平层理发育 0.30 m

4.紫红色薄层中粒长石砂岩,发育小型斜层理 0.50 m

3.紫红色中厚层中粒长石石英砂岩,发育小型斜层理 1.10 m

2.紫红色薄层中粒长石石英砂岩,见多组恐龙足迹 0.80 m

1.紫红色中厚层中粒石英砂岩,发育小型斜层理,未见底

1.00 m

早白垩世洛河组主要由 3 个岩性段组成(图 4):下段由暗紫红色、紫灰色块状泥岩、夹暗紫色微-薄层泥质粉砂岩、灰黄色厚层“砾状”砂岩组成,发育水平层理与低角度斜层理;中部为紫红色薄层石英细砂岩、细-中粒长石石英砂岩,砂岩普遍具大型板状斜层理、交错层理、平行层理,局部砂岩层面发育浅成流水波痕、雨痕、雹痕及虫管爬行迹;上段由紫红色、灰黄色块状泥岩、粉砂质泥岩、薄层泥质粉砂岩组成,发育水平层理与低角度斜层理。

4.2 恐龙足迹地层结构特征

区内恐龙足迹主要分布在早白垩世洛河组紫红色薄层中粒长石石英砂岩层面上,见多组恐龙行迹呈凹型近直线型分布。恐龙足迹产出的地层柱

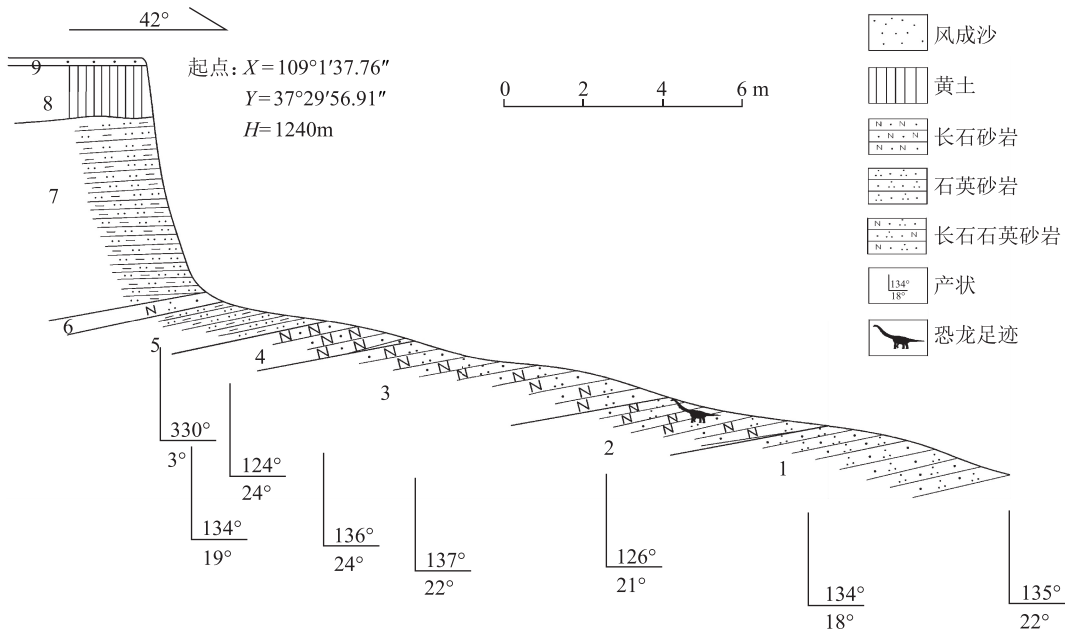


图 4 靖边龙洲恐龙足迹产地实测剖面

Fig. 4 Measured section of the study area for dinosaur tracks in Longzhou Town, Jingbian County

状图如图 5 所示。

从剖面结构垂向上看,恐龙足迹分布在洛河组中上部沙丘中及沙漠湖岸。总体沉积物粒度下粗上细;单层由 10~20 cm 变为 5~8 cm,厚度由厚变薄,层系厚度由 1.10 m 变为 0.20 m,层系厚度也明显变薄;同时丘间细粒沉积或泥质相对增多。而层理类型由大中型斜层理向小型斜层理、水平层理变化,但风向相对变化不大,总体反映出属风力持续作用形成的中小型沙丘。剖面上部的沙漠湖反映

浅水湖泊特征,沉积物以泥质、粉砂质为主,粒度细,颜色浅,单层沉积厚度薄,水平层理极发育,并有波状交错层、泥裂出现。

4.3 恐龙足迹形态特征

靖边县恐龙足迹化石分布在龙洲镇白土坪惠桥水库岸边,在约 2000 m<sup>2</sup>红色丹霞景观内,目前已发现 9 组恐龙行迹,分布在洛河组上部紫红色块状泥岩、粉砂质泥岩与微-薄层泥质粉砂岩、长石石英砂岩的斜坡岩层面上,岩层发育中小型斜层理。

| 岩石地层 |                  | 层号 | 层厚/m | 柱状图<br>1:200 | 沉积构造 | 岩性描述                                          | 沉积环境  |
|------|------------------|----|------|--------------|------|-----------------------------------------------|-------|
| 组    | 代号               |    |      |              |      |                                               |       |
| 洛河组  | Q                | 9  | 0.20 |              |      | 松散风成沙                                         | 现代沙漠  |
|      |                  | 8  | 1.30 |              |      | 风积黄土                                          | 风成黄土  |
|      | K <sub>1</sub> l | 7  | 4.40 |              |      | 紫红色薄层泥质粉砂岩, 风化色为灰黑色, 碎屑粒度以粉砂质为主, 次圆状, 磨圆、分选中等 | 沙漠湖亚相 |
|      |                  | 6  | 0.20 |              |      | 紫红色薄层中粒长石石英砂岩, 斜层理发育                          | 小型沙丘  |
|      |                  | 5  | 0.30 |              |      | 紫红色细粒泥质粉砂岩, 单层厚 10~20cm, 发育水平层理               | 湿丘间   |
|      |                  | 4  | 0.50 |              |      | 紫红色薄层中粒长石砂岩, 单层厚 5~8cm, 发育小型斜层理               | 小型沙丘  |
|      |                  | 3  | 1.10 |              |      | 紫红色中厚层中粒长石石英砂岩, 单层厚 15~34cm, 小型斜层理            | 大型沙丘  |
|      |                  | 2  | 0.80 |              |      | 紫红色薄层中粒长石石英砂岩, 见多组恐龙足迹                        | 小型沙丘  |
|      |                  | 1  | 1.00 |              |      | 紫红色中厚层中粒石英砂岩, 单层厚 15~25cm, 发育小型斜层理            | 大型沙丘  |

图 5 靖边龙洲恐龙足迹产地综合地层柱状图

Fig. 5 Stratigraphic column of the study area for dinosaur tracks in Longzhou Town, Jingbian County

恐龙足迹以连续凹型的形式出现,形态类似婴儿脚掌(图6-a),垂直砂岩层面留有踩踏痕迹,有5组行迹较长,每对足迹保存完整且清晰,步幅比较匀称;其中一组足迹保留有较清晰的趾痕。这些恐龙足迹点均呈原始状态清晰保存,足迹形态整体呈“直线形”(图6-b),判断恐龙足迹可能是从沙丘向小湖泊边行走留下的足迹。恐龙足迹保留趾痕较少,目前仅有9号行迹保留有两趾痕迹,经初步判断,这些恐龙为肉食性兽脚类恐龙,个体相对较小。

## 5 恐龙足迹形成的沉积环境

### 5.1 洛河组沉积环境

研究区恐龙足迹化石主要分布在早白垩世洛河组,特别是洛河组中上部层位的紫红色薄层细-中粒石英砂岩中。

对于洛河组的沉积环境有2种观点,一种认为属河流、湖泊沉积环境<sup>[7]</sup>;另一种则认为属沙漠相沉积环境<sup>[3-4]</sup>,分歧较大。侏罗纪燕山运动末的隆升造成盆地抬升掀斜遭受剥蚀,早白垩世初期盆地伸展,洛河组早期沉积时盆地具准平原性质,河流宽阔,沉积了紫红色、棕红色、砖红色厚层砂岩,并夹有灰白色高岭石质细砂岩,砂岩体中发育大型槽状交错层、交错层理,含砾砂岩、中粒长石砂岩夹少量粉砂岩沉积组合,属河流及冲积扇沉积。中期形成紫红色、棕红色、砖红色厚层中粗粒砂岩、细砂岩,砂岩体中发育大-小型风成板状交错层理、风成斜层理为特征的中粗粒长石砂岩及薄层泥质粉砂

岩,明显具有沙漠相沙丘亚相、丘间亚相;晚期则形成一套浅紫红色块状泥岩、粉砂质泥岩夹薄层泥质粉砂岩组合,发育水平层理、低角度斜层理、泥裂等。

### 5.2 恐龙足迹的形成环境

洛河组沙漠湖水体较浅,风成交错层理类型复杂、产状变化大,中小型斜层理与水平层理之间风成沉积体系呈现出“上截下切”特点,风成沉积体系反映出以风成作用为主并伴随季节性流水作用特点。恐龙行迹分布在洛河组上部紫红色块状泥岩、粉砂质泥岩与微-薄层泥质粉砂岩、长石石英砂岩的斜坡岩层面上,岩层发育小型斜层理,砂岩单层厚度仅3~8 cm,沙丘高度低缓,恐龙足迹“双足”均分布在同一岩层面上,但行走的轨迹为一低缓的“斜面”,反映出恐龙足迹形成环境为低缓沙丘与浅水沙漠湖间的近湖岸地带。

小型沙丘、湿沙丘与浅水沙漠湖相互依存,持续风成作用与短时雨季流水作用,气候温暖干旱,适合小型肉食性恐龙生存。恐龙足迹形成于浅水沙漠湖泊亚相-小型湿沙丘亚相间沉积环境。

## 6 结 论

靖边龙洲丹霞地貌是陕北地区丹霞地貌波浪谷景观的典型代表,在早白垩世洛河组丹霞景观区发现恐龙足迹化石非常难得。从恐龙行迹看,恐龙足迹可能从沙丘向小湖泊边行走留下的足迹。龙洲地区沙漠沉积环境中发现的恐龙足迹十分罕见,对研究恐龙生态、古气候变化、早白垩世沉积环境



图6 靖边龙洲洛河组中的恐龙足迹

Fig. 6 Dinosaur trackways discovered in the Luohe Formation in Longzhou, Jingbian County

a—恐龙行迹 JDT-1; b—恐龙行迹 JDT-2



等都具有重大意义,也提升了丹霞地貌的科学价值与内涵。

含恐龙足迹地层岩石组合为一套典型沙漠相“红色砒砂岩”系,岩石组合以紫红色-暗紫红色厚层-块状粉砂质泥岩、泥质粉砂岩与薄层中-粗粒长石石英砂岩、石英砂岩为主,构成典型的丹霞地貌景观。岩石具中-粗粒结构,发育大型的板状交错层理、斜层理等,风成沙丘及沙漠湖泊特点明显。小型沙丘、湿沙丘与浅水沙漠湖相互依存,持续风成作用与短时雨季流水作用、温暖干旱的气候,适合小型肉食性恐龙生存。恐龙足迹形成于浅水沙漠湖泊亚相-小型湿沙丘亚相间沉积,对于沙漠沉积环境详细研究,也具有重要的科学价值。

**致谢:**对参与陕西靖边龙洲丹霞地貌详查野外工作的同事和审稿专家表示诚挚感谢。

## 参考文献

- [1] 唐永忠,邢立达,徐涛,等.陕西中鸡发现白垩纪恐迹龙足群[J].地质通报,2018,37(7): 1193-1196.
  - [2] 唐永忠,徐涛,邢立达,等.陕西神木白垩纪恐迹龙足迹沉积环境与时代研究[J].矿产勘查,2018,5(5): 793-802.
  - [3] 张玉光,李建军,胡松梅,等.陕西神木侏罗纪恐迹龙足迹的新发现及其地层学意义[J].地层学杂志,2012,36(1): 60-64.
  - [4] 谢渊,王剑,江新胜,等.鄂尔多斯盆地白垩系沙漠相沉积特征及其水文地质意义[J].沉积学报,2005,23(1): 73-83.
  - [5] 齐骅,李国栋.鄂尔多斯盆地志丹群沉积时期的古沙漠盆地体系[J].西北地质科学,1996,17(1): 63-90.
  - [6] 郭庆银,李子颖,杨圣彬,等.鄂尔多斯盆地西北部白垩系沉积特征[J].铀矿地质,2006,22(3): 143-150.
  - [7] 江新胜,徐金沙,潘忠习.鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠石英沙颗粒表面特征[J].沉积学报,2003,21(3): 416-422.
- ①王洪亮,李维均.陕西省神木大柳塔—孙家盆地区 1:5 万区调报告.陕西省地质调查院,1999.