



# 新疆准噶尔盆地发现世界最大的亚洲足迹

李阳<sup>1,2,3</sup>, 蒋顺兴<sup>1,2</sup>, 汪筱林<sup>1,2,3\*</sup>

1. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044;

2. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 北京 100044;

3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

\* 联系人, E-mail: wangxiaolin@ivpp.ac.cn

2019-09-10 收稿, 2020-03-10 修回, 2020-03-11 接受, 2020-03-12 网络版发表

国家自然科学基金(41572020, 41688103)、中国科学院B类战略性先导科技专项(XDB26000000, XDB18000000)和中国科学院青年创新促进会(2019075)资助

**摘要** 在新疆准噶尔盆地西北缘乌尔禾地区下白垩统吐谷鲁群胜金口组, 发现保存在灰绿色细砂岩层面上的13个恐龙足迹, 形成3条行迹和4个孤立足迹. 通过对足迹、行迹特征的详细观察研究, 识别出两种足迹类型, 其中大型三趾型足迹为一兽脚类足迹新种. 依据其尺寸大(长47.0~56.0 cm、宽31.0~42.0 cm)、趾行式、无拇趾印迹和尾迹、轴对称、V字形、蹠趾垫(脚跟)明显等特征, 将其归入实雷龙足迹科(Eubrontidae)亚洲足迹属, 并建立一个新种: *Asianopodus niui* ichnosp. nov. (牛氏亚洲足迹), 这是目前发现的最大亚洲足迹. 中型三趾型足迹相对较小(长21.0~27.0 cm、宽18.0~20.0 cm)、趾行式、无拇趾印迹和尾迹、轴对称、外侧趾间角为46.63°~51.40°、蹠趾垫印迹明显, 归入跟垫亚洲足迹(*Asianopodus pulvinicalx*). 相关分析表明, 两种足迹类型的造迹恐龙都处于漫步状态, 行走于滨浅湖环境.

**关键词** 亚洲足迹, 恐龙行迹, 下白垩统, 准噶尔盆地, 新疆乌尔禾

世界上最早关于足迹化石的记录是1802年在美国康涅狄格河谷三叠系红层砂岩中发现的三趾型足迹. Hitchcock<sup>[1]</sup>认为是一种鸟类足迹, 命名为*Ornithoidichnites fulvicoides*. 最早关于足迹化石的文章是1828年在《伦敦和巴黎观察家》(*London & Paris Observer*)发表的未署名简讯, 描述了在苏格兰采石场红色砂岩中发现的足迹化石, 被认为是迷齿螈的足迹<sup>[2]</sup>. 中国足迹化石的研究最早始于1929年, Chardin和Young<sup>[3]</sup>报道了在陕西神木上侏罗统地层中发现的中国最早的足迹, Kuhn<sup>[4]</sup>在1958年正式命名其为杨氏中国足迹(*Sinoichnites youngi*). 随后, 杨钟健<sup>[5-9]</sup>进一步对中国的足迹进行详细描述和研究, 共命名6个足迹属和7个足迹种. 截至目前, 中国已在22个省市自治区发现了中生代爬行

动物和鸟类足迹, 其中恐龙足迹41属61种、翼龙足迹1属3种、鸟类足迹9属11种<sup>[10-16]</sup>.

新疆准噶尔盆地乌尔禾地区古生物学的研究始于20世纪60年代. 1963年, 新疆石油科学研究所魏景明采集了一批具有重要意义的古脊椎动物化石, 由杨钟健<sup>[17]</sup>进行研究和鉴定, 证明是一种翼龙化石, 并定名为魏氏准噶尔翼龙(*Dsungaripterus weii*). 随后, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所组成了新疆古生物考察队, 在1964年对乌尔禾地区进行了进一步的调查和发掘. 除了采集大量翼龙化石外, 还发现有龟鳖类、鳄类和多种恐龙化石, 并对富含化石的地层进行了对比和研究, 证明乌尔禾地区是一个富含早白垩世陆生脊椎动物化石的新地点<sup>[18]</sup>. 这些脊椎动物化石包括翼龙类

引用格式: 李阳, 蒋顺兴, 汪筱林. 新疆准噶尔盆地发现世界最大的亚洲足迹. 科学通报, 2020, 65: 1875-1887

Li Y, Jiang S X, Wang X L. The largest species of *Asianopodus* footprints from Junggar Basin, Xinjiang, China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1875-1887, doi: 10.1360/TB-2019-0513

魏氏准噶尔翼龙和复齿湖翼龙(*Noriopterus complicidens*)、龟鳖类乌尔禾中国龟(*Sinemys wuerhoensis*)、蛇颈龙类威远中国上龙(*Sinoptiosaurus weiyuanensis*)、鳄类天山贫齿鳄(*Edentosuchus tienshanensis*)、恐龙类艾里克敏捷龙(*Phaedrolosaurus ilikensis*)、小巧吐谷鲁龙(*Tugulusaurus faciles*)、石油克拉玛依龙(*Kelmaysaurus petrolicus*)、平坦乌尔禾龙(*Wuerhosaurus homheni*)、似蒙古亚洲龙(cf. *Asiatosaurus mongolienensis*)和圆顶龙科(Camarasauridae)的成员,并将这一脊椎动物化石群命名为乌尔禾翼龙动物群<sup>[18]</sup>。2006年以来,中国科学院古脊椎动物与古人类研究所哈密科考队为了研究对比天山南北脊椎动物群,在哈密和乌尔禾地区进行了十多年的连续科学考察。在哈密地区发现了大量雌雄保存的幼年到成年的哈密翼龙及其3D翼龙蛋与胚胎<sup>[19,20]</sup>,以及恐龙、龟鳖类和各类脊椎动物足迹等,并称之为哈密翼龙动物群。在乌尔禾地区除了发现丰富的翼龙、恐龙化石外,还发现了大量的翼龙、恐龙、鸟类和龟鳖类足迹等组成的足迹化石群。近年来,也有研究者对主要陈列于乌尔禾魔鬼城奇石馆中零星足迹化石进行了报道,包括翼龙类、鸟类、兽脚类、龟类和剑龙类足迹<sup>[21~24]</sup>。本研究通过对乌尔禾地区野外现场发现的兽脚类足迹系统描述,在此基础上对行迹以及足迹层的岩石学特征进行分析,来推断造迹恐龙的行为习性和形成足迹的古环境特点。

## 1 区域地质背景和地层层序描述

乌尔禾地区位于准噶尔盆地的西北缘,属于克拉玛依市,距市区约100 km。乌尔禾地区出露的地层以白垩纪湖相沉积为主,主要发育下白垩统吐谷鲁群,而上白垩统艾里克群出露不完全。杨钟健等人<sup>[18]</sup>把下白垩统自下而上划分为下条带组、灰绿色组和上条带组(图1),分别对应赵喜进<sup>[25]</sup>的呼图壁河组、胜金口组和连木沁组。呼图壁河组岩性为厚层、中厚层灰绿色细粒砂岩与红褐色、浅红色泥岩互层或呈泥岩透镜体,底部为中厚层黄绿色角砾岩,砂岩中发育枕状钙质结核。胜金口组岩性为薄层-巨厚层灰绿色砂岩与灰黄色、灰绿色泥岩互层或呈泥岩透镜体,在胜金口组的中上部发育大量大小不等的钙质结核,顶部为厚约1.5 m的白色凝灰质砂岩标志层。连木沁组岩性为薄层-巨厚层灰绿色砂岩与薄层红褐色、浅红色泥岩互层,在连木沁组顶部的砂岩中发育大量铁质结核<sup>[18,25]</sup>。

本研究记述的黄羊泉水库兽脚类足迹地点位于乌

尔禾西部,实测足迹化石点地层剖面分为3层,厚16.5 m(图1)。地层序列如下(从上往下):第3层(未见顶):由下部的红色泥岩和上部的杂色细粒砂岩(红色泥岩、灰色泥岩、细粒砂岩互层)组成,砂岩中含有钙质结核,层厚4.0 m;第2层:由下部的泥岩和上部灰色细粒砂岩组成,砂岩中夹两层风暴岩以及多层杂色泥岩,砂岩中含有球形、串珠形钙质结核,层厚12.2 m;第1层(未见底):灰绿色细粒砂岩,细粒砂岩顶部为6 cm厚细粒砂岩(分两层,质硬),层面发育兽脚类足迹、对称波痕和虫迹,厚度0.3 m。

根据所测剖面的岩石学特征和野外实勘,足迹层位于白色标志层之下,足迹剖面整体的岩性为灰绿色细粒砂岩与灰色泥岩、杂色泥岩互层,砂岩中含有丰富的大小不等的钙质结核,与杨钟健等人<sup>[18]</sup>研究中描述的第6层岩性特征一致,足迹层赋存于灰绿色组(胜金口组)的上部(图1)。

## 2 研究材料和方法

恐龙足迹化石保存在长约12 m,宽约7 m的灰绿色细粒砂岩层面上(图2),正模(凹型),层面近于水平。足迹化石层分为两层,两层面相差2~5 cm,上部层面保存6个恐龙足迹(行迹T1和I-3、I-4),下部层面保存7个恐龙足迹(行迹T2、T3和I-1R&I-2R),共形成3条行迹,4个孤立足迹。足迹化石保留在原地,对其中保存较好的足迹(T1-3R、I-1R、I-2R、T2-5R、T2-6L)制作了模型。足迹层面同时保存了对称波痕和2条虫迹。

本研究采用常规的古生物学研究方法,在野外对足迹进行编号并实地测量足迹、行迹参数。野外编号中T表示一条行迹,可包括多个足迹,I表示孤立的足迹,数字代表排序,数字后的R或者L表示右和左。足迹的长、宽、趾长、趾宽、趾间夹角以及行迹的单步长、复步长、步幅角采用Thulborn<sup>[26]</sup>提出的测量方法,趾尖三角形长宽的测量参照Weems<sup>[27]</sup>和Lockley<sup>[28]</sup>的方法。此外,我们精确测量了每个足迹之间的方位和距离,对每个足迹进行拍照并在工程制图方格纸上按相同比例绘制足迹的轮廓和位置,足迹轮廓线的绘制沿着足迹边缘曲率最大的位置,重要的足迹进行硅胶翻模。室内根据野外照片、测量的参数、图纸和模型,用CorelDRAW软件进行矢量化。根据测量的足迹和行迹参数,按照Alexander<sup>[29]</sup>、Thulborn<sup>[26]</sup>提出的恐龙速度计算公式,以及Alexander<sup>[29]</sup>、Henderson<sup>[30]</sup>、Xing等人<sup>[31]</sup>提出的恐龙臀高和体长的估算方法对造迹者的古

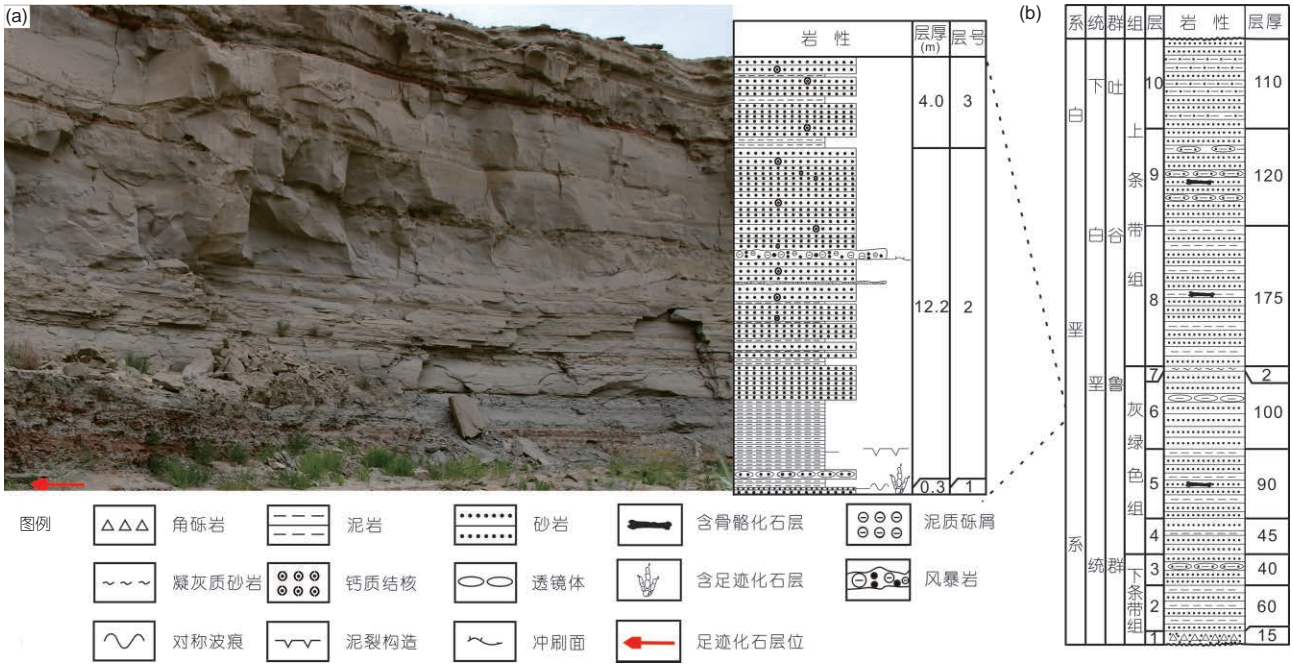


图 1 乌尔禾黄羊泉水库足迹点综合柱状图。(a) 黄羊泉水库足迹剖面野外照片和综合柱状图; (b) 乌尔禾地区下白垩统综合柱状图(引自杨钟健等人<sup>[18]</sup>)

Figure 1 The comprehensive column of Huangyangquan Reservoir tracksite in Urho. (a) The photograph and comprehensive column of Huangyangquan Reservoir tracksite; (b) comprehensive column of Lower Cretaceous in Urho (Young et al.<sup>[18]</sup>)

行为习性进行研究。

### 3 足迹化石系统分类学描述

#### 3.1 大型兽脚类足迹——牛氏亚洲足迹(*Asianopodus niui* ichnosp. nov.)

Dinosauria Owen, 1842

Suborder Theropoda Marsh, 1881

Infraorder Carnosauria von Huene, 1920

Ichnofamily Eubrontidae Lull, 1904

Ichnogenus *Asianopodus* Matsukawa, Shibata, Kuki-hara, Koarai et Lockley, 2005

模式种: 跟垫亚洲足迹(*Asianopodus pulvinicalx*)

鉴定特征(diagnosis): 小到中等大小足迹, 两足行走, 趾行式, 三趾型, 接近轴对称, 一般呈V字形, 足迹长27.0~30.0 cm, 长大于宽, 具有清晰的蹠趾垫(脚跟)印迹, 外侧趾间夹角42°~59°。

牛氏亚洲足迹(足迹新种)*Asianopodus niui* ichnosp. nov.(图2, 3)

词源(etymology): 种名*niu*献给乌尔禾足迹的发现者牛春旺先生, 感谢他为乌尔禾足迹的发现及化石保

护做出重要贡献。

正型(holotype): 野外编号为T1-3R(图3(a)), 足迹化石保留在原地, 模型编号为IVPP CV 26286.1(图3(a)), 保存在中国科学院古脊椎动物与古人类研究所(IVPP)。

层位和地点(horizon and locality): 下白垩统吐谷鲁群胜金口组, 新疆维吾尔自治区克拉玛依市乌尔禾区黄羊泉水库边。

副型(paratype): 野外编号为I-1R(图3(b)), 足迹化石保留在原地, 模型编号为IVPP CV 26286.2(图3(b)), 保存在中国科学院古脊椎动物与古人类研究所(IVPP)。

归入标本(referred specimens): 行迹T1除了正型外的3个足迹, 以及I-2R、I-3和I-4, 足迹化石保留在原地; 其中足迹I-2R翻模, 模型编号为IVPP CV 26286.3(图3(c)), 保存在中国科学院古脊椎动物与古人类研究所(IVPP)。

鉴定特征(diagnosis): 大型三趾型足迹, 趾行式, 无拇趾印迹和尾迹, 足迹为轴对称图形, V字形, 具有非常明显的蹠趾垫(脚跟)印迹, 蹠趾垫呈近似椭圆形, 足迹全长47.0~56.0 cm, 宽31.0~42.0 cm, 宽长比在0.66~0.75之间, II-III趾以及III-IV趾的趾间角近似相等, 外侧趾间角在49.00°~55.34°之间, III趾略长于II趾, 明显长

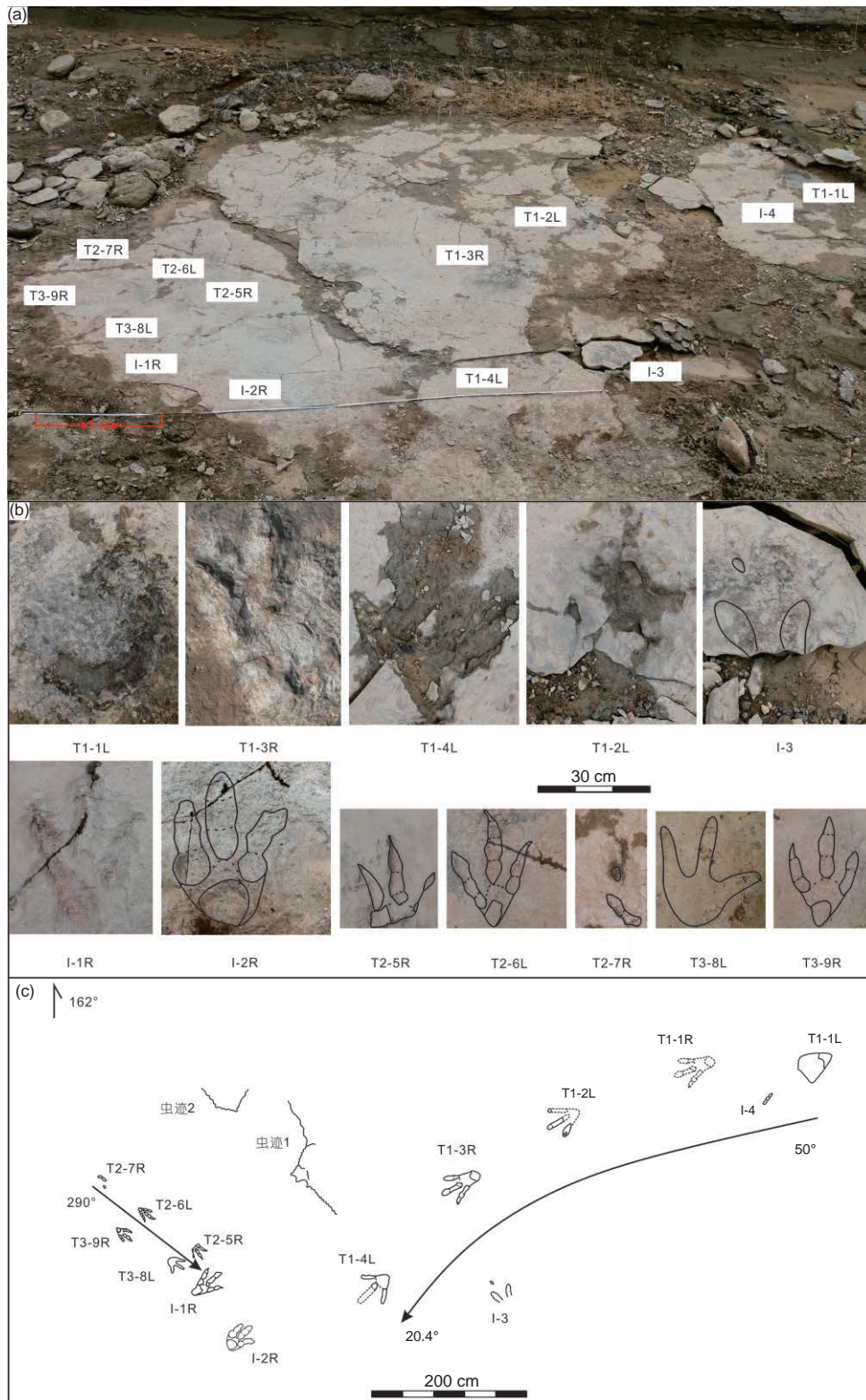


图2 乌尔禾黄羊泉水库足迹化石野外分布图。(a) 足迹化石野外分布照片(斜视图); (b) 每个野外足迹化石的放大照片; (c) 足迹化石分布线条图(俯视图)  
**Figure 2** The track distribution map in Huangyangquan Reservoir, Urho. (a) The distribution photograph of footprints (in oblique view); (b) close-up of each footprint; (c) outline drawings of each footprint (in over-head perspective)



图3 牛氏亚洲足迹标本的照片、模型及线条图(比例尺为20 cm)。 (a) 正型(野外编号T1-3R, 模型编号IVPP CV 26286.1); (b) 副型(野外编号I-1R, 模型编号IVPP CV 26286.2); (c) 归入标本(野外编号I-2R, 模型编号IVPP CV 26286.3)

Figure 3 The photograph, cast and outline drawings of *A. niui* ichnosp. nov. (scale bar=20 cm). (a) The holotype (field number, T1-3R and cast number, IVPP CV 26286.1); (b) the paratype (field number, I-1R and cast number, IVPP CV 26286.2); (c) a referred specimen (field number, I-2R and cast number, IVPP CV 26286.3)

于IV趾, III趾第3个趾垫向IV趾方向弯曲, 趾垫式为3-3-2, 爪尖较钝, 趾尖三角形长宽比( $M$ )在0.34~0.37之间, 很小, 单步长164~180 cm, 复步长为328~336 cm.

(i) 描述. 乌尔禾黄羊泉水库识别出的实雷龙足迹科(Eubrontidae)包括1条行迹和4个孤立足迹(具体参数见表1), 行迹窄, 近似一条直线. 行迹包含4个足迹, 根据足迹的复步长(表1), 足迹T1-1L和T1-2L之间还存在一个足迹T1-1R. 保存最好的足迹是T1-3R; 4个孤立的足迹中, I-1R保存最好, I-2R次之; 其余足迹都保存较差. 根据表1和图3, 保存最好的两个足迹为大型两足行

走足迹, 三趾型, 无拇趾印迹, 缺乏前足印迹和尾迹, 足迹整体呈V字形, 全长47.0~56.0 cm, 宽31.0~42.0 cm, 宽长比在0.66~0.75之间. 爪尖较钝, 保留爪尖的趾, 爪尖偏向行迹外侧. III趾最长, II趾次之, IV趾最短. 足迹T1-3R的III趾明显长于IV趾, 是由于两趾都没有保存爪尖. 而足迹I-1R的III趾不比IV趾长很多是由于III趾没有保存爪尖而IV趾保存了爪尖, 因此我们认为乌尔禾大型足迹的III趾略长于II趾, 明显长于IV趾. II趾、III趾、IV趾趾宽差别不大, 每个趾的趾垫清晰, 有固定的趾垫式3-3-2. II趾有3个趾垫, 近似椭圆形, III趾

表1 牛氏亚洲足迹(新种)(*A. niui ichnosp. nov.*)测量参数

Table 1 The parameters of *A. niui ichnosp. nov.*

足迹编号	足迹			II-III-IV		趾垫式	趾间角			趾尖三角形			步长		
	长(cm)	宽(cm)	宽/长	长(cm)	宽(cm)	II-III-IV	II-III	III-IV	II-IV	长(cm)	宽(cm)	长/宽(M)	单步长(cm)	复步长(cm)	步幅角
T1-1L	45.0	40.0	0.89												
T1-2L	45.0?	40.0	0.89?	26.0?-31.0?-20?	4.0-6.0-8.0	3-3-2	30.74°	29.17°	59.91°	12.0	38.7	0.31		328	
T1-3R	56.0	42.0	0.75	30.0-30.0-20.0	7.8-9.0-8.0		28.70°	26.64°	55.34°	14.0	38.0	0.37	164		162.0°
T1-4L	52.0?	44.0	0.85?	20.9-35.0?-20.0	7.5-7.5-7.0		44.21°	34.28°	78.49°	15.0	42.5	0.35	180	336	
I-1R	47.0	31.0	0.66	25.0-26.0-22.0	7.0-6.4-7.0	3-3-2	24.00°	25.00°	49.00°	10.0	29.0	0.34			
I-2R	41.0	30.0	0.73	23.5-26.0-22.5	9.0-8.5-7.5	3-3-2	8.96°	24.80°	33.76°	10.0	30.0	0.33			
I-3	30.0	26.0		17.0-6.0-15.0	8.0-3.0-7.5				42.39°	7.9	22.8	0.35			
I-4	16.0	6.0													

有3个趾垫,第1趾垫近似椭圆形,第2趾垫近似梯形,第3趾垫近似矩形并且向IV趾方向弯曲,IV趾有2个趾垫,近似椭圆形。足迹跟部具有明显的近似椭圆形的蹠趾垫,应为三趾联合形成。外侧趾间角较大在49.00°~55.34°之间,II-III趾趾间角和III-IV趾趾间角近似相等。趾间三角形的长宽比很小在0.34~0.37之间。与T1-3R和I-1R相比,足迹I-2R印痕浅、粗壮、整体紧凑、趾间角较小,但它们的趾垫式和趾垫形状均相似,应为同一类造迹者所留。其余足迹受后期风化破坏保存不好,足迹T1-1L只保留明显的跟部印痕,T1-2L、T1-4L以及I-3保留了不完整的三趾,I-4只保留了一趾,具体足迹参数见表1。

(ii) 比较与讨论. 从足迹的大小和形态来看,本研究描述的大型三趾型足迹,两足行走,趾垫清晰,爪尖较钝, *M*值较小,无拇趾印迹、前足印迹和尾迹等特征符合实雷龙足迹科(*Eubrontidae*)的特征<sup>[26,28,32]</sup>。目前中国已经发现的实雷龙足迹科主要有6个属和1个属种未定的成员,分别为亚洲足迹属(*Asianopodus*)<sup>[33]</sup>、实雷龙足迹属(*Eubrontes*)<sup>[34]</sup>、查布足迹属(*Chapus*)<sup>[35]</sup>、子洲足迹属(*Zizhoupus*)<sup>[12]</sup>、湖南足迹属(*Hunanpus*)<sup>[36]</sup>、张北足迹属(*Changpeipus*)<sup>[5]</sup>、实雷龙足迹科属种不定(*Eubrontidae* *igen. et isp. indet.*)<sup>[16]</sup>。本研究描述的大型三趾型足迹形态与亚洲足迹属(*Asianopodus*)非常相似,亚洲足迹属呈趾行式,三趾型,接近轴对称图形,具有清晰的蹠趾垫(脚跟)印迹,足迹长大于宽等特征。目前已经报道的亚洲足迹属共有2种,分别为模式种跟垫亚洲足迹(*A. pulvinicalx*)和粗壮亚洲足迹(*A. robustus*)。跟垫亚洲足迹呈三趾型,趾行式,足迹长27.0~30.0 cm,接

近轴对称图形,形状为V字形,具有非常清楚的蹠趾垫(脚跟)印迹,足迹长度大于宽度,III趾明显比II趾和IV趾长,宽长比为0.61~0.72之间,外侧趾间角在42°~59°之间<sup>[33]</sup>(图4(a))。粗壮亚洲足迹的正型是李建军等人<sup>[37]</sup>在内蒙古鄂托克旗6号点发现,具有明显的蹠趾垫,形态和外侧趾间角的大小符合亚洲足迹属的特征,但是趾的宽度相比于模式种来说更大,足迹轮廓不如模式种紧凑(图4(b))。乌尔禾黄羊泉大型足迹也是三趾型,趾行式,接近轴对称图形,形状为V字形,具有非常明显的蹠趾垫(脚跟)印迹,呈近似椭圆形,足迹长度大于宽度,宽长比在0.66~0.75。这些特征都与亚洲足迹属的特征一致,但也存在下列明显差异使黄羊泉大型足迹与跟垫亚洲足迹和粗壮亚洲足迹相区别:(1) 个体大。黄羊泉大型足迹全长47.0~56.0 cm,宽31.0~42.0 cm,比跟垫亚洲足迹和粗壮亚洲足迹要大很多,也是乌尔禾地区发现的最大的兽脚类足迹。乌尔禾地区目前已知的最大兽脚类足迹是Xing等人<sup>[23]</sup>在乌尔禾黄羊泉水库发现的一个保存不完整的兽脚类足迹,全长48.0 cm。目前已知的最大亚洲足迹是李建军等人<sup>[37]</sup>在内蒙古鄂托克旗查布地区1号点发现的,其最大长度为38.0 cm。因此,乌尔禾黄羊泉大型三趾型足迹全长是目前最大亚洲足迹的1.5倍。(2) II、III趾近于等长。乌尔禾黄羊泉大型三趾型足迹II趾和III趾长度近于相等,并长于IV趾,这与跟垫亚洲足迹和粗壮亚洲足迹中III趾明显比II趾和IV趾更长相区别。(3) 趾垫弯曲。在保存好的两个足迹中发现一个共性特征就是III趾第3个趾垫向IV趾方向弯曲,而在跟垫亚洲足迹和粗壮亚洲足迹中并未发现此特征。(4) 趾间角近于相等。乌尔

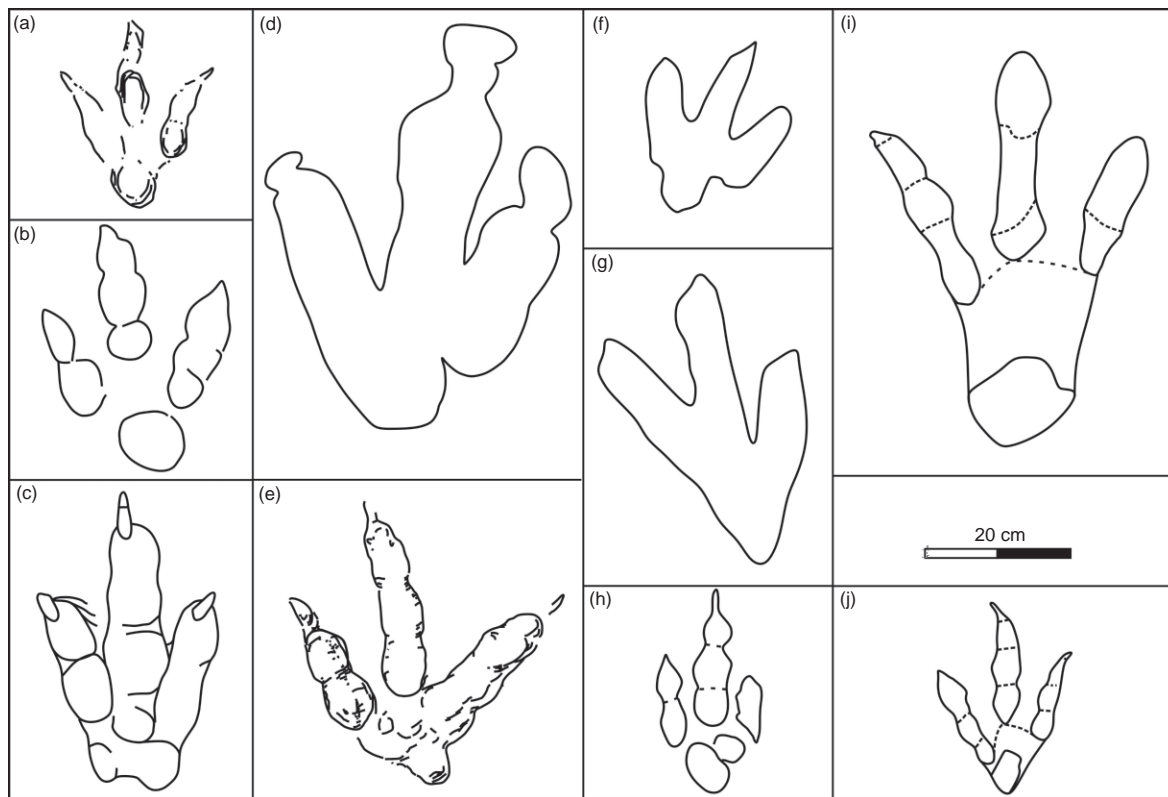


图 4 实雷龙足迹科的主要成员。(a) 跟垫亚洲足迹(*A. pulvinicalx*), 正型, 早白垩世, 日本<sup>[33]</sup>; (b) 粗壮亚洲足迹(*A. robustus*), 正型, 早白垩世, 内蒙古鄂托克旗<sup>[37]</sup>; (c) 巨大实雷龙足迹(*Eubrontes giganteus*), 正型, 早侏罗世, 美国马萨诸塞州<sup>[38]</sup>; (d) 洛克里查布足迹(*Chapus lockleyi*), 正型, 早白垩世, 内蒙古鄂托克旗<sup>[35]</sup>; (e) 王氏子洲足迹(*Zizhoupus wangi*), 正型, 中侏罗世, 陕西子洲<sup>[12]</sup>; (f) 九曲湾湖南足迹(*Hunanpus jiuquwanensis*), 正型, 晚白垩世, 湖南湘西<sup>[36]</sup>; (g) 石炭张北足迹(*Changpeipus carbonicus*), 正型, 早、中侏罗世, 吉林辉南<sup>[5]</sup>; (h) 实雷龙足迹未定属种(*Eubrontidae* igen. et isp. indet.), 晚侏罗世, 河北承德<sup>[16]</sup>; (i) 牛氏亚洲足迹(新种, *A. niui* ichnosp. nov.), 正型, 早白垩世, 新疆乌尔禾; (j) 跟垫亚洲足迹(*A. pulvinicalx*), 早白垩世, 新疆乌尔禾

Figure 4 The main genera of Eubrontidae. (a) *A. pulvinicalx*, the holotype, Early Cretaceous, Japan<sup>[33]</sup>; (b) *A. robustus*, the holotype, Early Cretaceous, Otag Qi, Inner Mongolia<sup>[37]</sup>; (c) *Eubrontes giganteus*, Early Jurassic, the holotype, Massachusetts USA<sup>[38]</sup>; (d) *Chapus lockleyi*, the holotype, Early Cretaceous, Otag Qi, Inner Mongolia<sup>[35]</sup>; (e) *Zizhoupus wangi*, the holotype, Middle Jurassic, Zizhou, Shaanxi<sup>[12]</sup>; (f) *Hunanpus jiuquwanensis*, the holotype, Late Cretaceous, Xiangxi, Hunan<sup>[36]</sup>; (g) *Changpeipus carbonicus*, the holotype, Early or Middle Jurassic, Huinan, Jilin<sup>[5]</sup>; (h) *Eubrontidae* igen. et isp. indet. Late Jurassic, Chengde, Hebei<sup>[16]</sup>; (i) *A. niui* ichnosp. nov., the holotype, Early Cretaceous, Urho, Xinjiang; (j) *A. pulvinicalx*, Early Cretaceous, Urho, Xinjiang

禾黄羊泉大型足迹 II - III 趾以及 III - IV 趾之间的趾间角近于相等, 而跟垫亚洲足迹以及粗壮亚洲足迹的正型 II - III 趾以及 III - IV 趾之间的趾间角差异较大(表 2)。实雷龙足迹属(*Eubrontes*)是最常见的肉食龙下目的足迹, 较大到大型两足行走足迹, 三趾型, 足长一般超过 25.0 cm, 爪子尖锐或圆钝, 趾宽、具有明显趾垫, III 趾短, 两侧趾夹角 25°~40°, 无拇趾印迹(罕见)和前足印迹, 无尾迹(图 4(c))。Olsen 等人<sup>[38]</sup>认为只要足迹其他的特征符合实雷龙足迹属的特征, 两侧趾间角可以大于 40°, 但是通常实雷龙足迹属的外形呈近似五边形特征<sup>[39]</sup>, 蹠趾垫保存不好或不保存, 足迹近似对称或不对称, 而乌尔禾黄羊泉水库大型三趾型足迹呈现 V 字形特征, 蹠趾垫痕迹保存明显, 足迹呈近似轴对称图形, 与实雷龙

表 2 跟垫亚洲足迹(*A. pulvinicalx*)和粗壮亚洲足迹(*A. robustus*)趾间角参数

Table 2 The divarication angles between digits of *A. pulvinicalx* and *A. robustus*

亚洲足迹	趾间角		
	II - III	III - IV	II - IV
跟垫亚洲足迹 <sup>[33]</sup>	22.5°	27.5°	50.0°
跟垫亚洲足迹 <sup>[33]</sup>	31.0°	28.0°	59.0°
跟垫亚洲足迹 <sup>[33]</sup>	18.0°	32.0°	50.0°
跟垫亚洲足迹 <sup>[33]</sup>	25.0°	17.0°	42.0°
粗壮亚洲足迹 <sup>[37]</sup>	18.0°	30.0°	48.0°

足迹属特征不符合。查布足迹属(*Chapus*)三趾爪迹较大, 尤其是第 III 趾爪迹, III 趾和 IV 趾的趾间角明显大

于Ⅱ趾和Ⅲ趾趾间角,即Ⅲ趾明显向Ⅱ趾一侧偏斜<sup>[35]</sup>(图4(d)),而乌尔禾黄羊水库大型三趾型足迹爪迹较小,Ⅲ趾和Ⅳ趾的趾间角与Ⅱ趾和Ⅲ趾趾间角近似相等。子洲足迹属(*Zizhoupus*)是Li和Zhang<sup>[12]</sup>在陕西子洲发现的中侏罗世早期肉食龙类足迹。足迹大小和本研究大型三趾型足迹相当,但子洲足迹呈明显的不对称形态,Ⅲ-Ⅳ趾趾间角是Ⅱ-Ⅲ趾趾间角的两倍(图4(e)),这与乌尔禾大型三趾型足迹明显不同。湖南足迹属(*Hunanpus*)是曾祥渊<sup>[36]</sup>命名的足迹属,模式种为九曲湾湖南足迹(*Hunanpus jiuquwanensis*)。其主要特征为较大型足迹(正型长33.2 cm),呈三叉形,保留了部分蹠骨印迹,蹠趾垫不明显,趾远端尖细等(图4(f))。乌尔禾黄羊水库大型足迹呈V字形,个体相对较大,蹠趾垫明显等特征与湖南足迹相区别。张北足迹属(*Changpeipus*)是Young<sup>[5]</sup>在1960年建立的,模式种为石炭张北足迹(*C. carbonicus*),其最主要的特点是蹠趾垫较小、Ⅳ趾长于Ⅱ趾、足迹轮廓为三角形、Ⅲ趾向远端膨大等特征(图4(g)),这与黄羊水库大型足迹相区别。Sullivan等人<sup>[40]</sup>在河北承德发现与安琪龙足迹保存在一起的一个较大型的足迹(图4(h)),李建军<sup>[16]</sup>将其归入实雷龙足迹科,属种未定。虽然蹠趾垫很清晰,但是趾间夹角很小,

尺寸也相对较小,所以与乌尔禾大型足迹是两种不同类型的足迹。因此我们认为乌尔禾黄羊水库大型三趾型足迹属于亚洲足迹,并建立新种:牛氏亚洲足迹(*A. niui* ichnosp. nov.),这是目前发现的世界上最大的亚洲足迹。

### 3.2 中型兽脚类足迹——跟垫亚洲足迹(*A. pulvinicalx*)

Infraorder Carnosauria von Huene, 1920

Ichnofamily Eubrontidae Lull, 1904

Ichnogenus *Asianopodus* Matsukawa, Shibata, Kukihara, Koarai et Lockley, 2005

*Asianopodus pulvinicalx* Matsukawa, Shibata, Kukihara, Koarai et Lockley, 2005(图2, 5)

归入标本:行迹T2和T3的5个足迹化石,足迹化石保留在原地,其中保存较好的T2-5R、T2-6L进行翻模,模型编号分别为IVPP CV 26286.4(图5(a))和IVPP CV 26286.5(图5(b)),保存在中国科学院古脊椎动物与古人类研究所(IVPP)。

(i) 描述。乌尔禾黄羊水库识别出的中型三趾型足迹包括两条行迹,行迹窄,近似一条直线,行迹T2

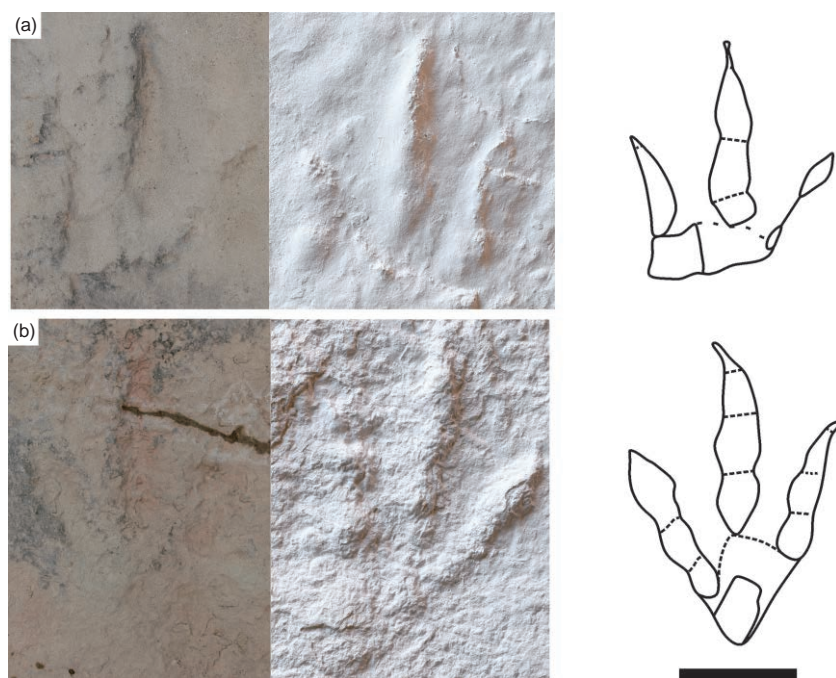


图5 乌尔禾黄羊水库足迹点跟垫亚洲足迹照片、模型及线条图(比例尺为10 cm)。 (a) 归入标本(野外编号T2-5R, 模型编号IVPP CV 26286.4); (b) 归入标本(野外编号T2-6L, 模型编号IVPP CV 26286.5)

Figure 5 The photographs, casts and outline drawings of *A. pulvinicalx* in the Huangyangquan Reservoir, Urho (Scale bar=10 cm). (a) Referred specimen (field number, T2-5R and cast number, IVPP CV 26286.4); (b) referred specimen (field number, T2-6L and cast number, IVPP CV 26286.5)



包含3个足迹, 保存最好是T2-5R和6L; 行迹T3包含2个足迹, 整体印痕较浅, 保存较好的是T3-9R, T3-8L只保存足迹轮廓; 其余足迹都保存较差(图2, 5)。根据表3和图5, 保存较好的3个足迹为中型两足行走足迹, 三趾型, 无拇趾印迹, 缺乏前足印迹和尾迹, 足迹整体呈V字形, 全长21.0~27.0 cm, 宽18.0~20.0 cm, 宽长比0.72~0.86。爪尖较钝, III趾最长, 明显长于II趾和IV趾, II趾和IV趾长度近似相等。II趾、III趾和IV趾趾垫宽度相差不大, 每个趾的趾垫清晰(T2-5R只有III趾趾垫清晰), 保存最好的足迹T2-6L的趾垫式为3-3-3, 足迹T3-9R的趾垫式为3-3-2?。T3行迹的印痕浅但足迹T3-9R趾的形态与T2-6L类似, 两个足迹第IV趾第1和第2趾垫形态也一样。因此, 我们认为T3-9R第IV趾也应有3个趾垫, 只是印痕很浅或者没有保留, 无法识别。因而, 中型足迹的趾垫式应为3-3-3; II趾和III趾有3个趾垫, 第1趾垫近似三角形, 其余2个趾垫近似椭圆形, IV趾的3个趾垫都近似椭圆形。此外, 本研究足迹T2-5R III趾第3趾垫也向IV趾弯曲, 类似于上述大型足迹的特征。足迹跟部具有明显的近似椭圆形的蹠趾垫, 应为三趾联合形成, 外侧趾间角较大, 在46.63°~51.40°, 趾间三角形的值很弱在0.44~0.54之间。保存较差的足迹T2-7R只保存了不完整的II趾和III趾, T3-8L只保存了足迹轮廓, 足迹参数具体见表3。

(ii) 比较与讨论。从足迹的大小和形态来看, 本研究描述的中型三趾型足迹, 两足行走, 趾垫清晰, 爪尖较钝, M值较小, 无拇趾印迹、前足印迹和尾迹等特征符合实雷龙足迹科的特征<sup>[26,28,32]</sup>。保存较好的中型足迹T2-5R、T2-6L和T3-9R呈三趾型, 无前足、尾迹和拇趾印痕, 足迹长21.0~27.0 cm, 接近轴对称图形, 形状为V字形, 具有非常清楚的蹠趾垫(脚跟)印迹。虽然T3-9R印痕较浅, 但蹠趾垫印痕清晰可见, 足迹长大于宽, III趾

明显长, 宽长比在0.72~0.86之间, 外侧趾间角在46.63°~51.40°之间, 这些特征与跟垫亚洲足迹(*A. pulvinicalx*)的主要特征相似。因此, 我们将其归入跟垫亚洲足迹(*A. pulvinicalx*)。

#### 4 乌尔禾恐龙足迹化石保存状态、古环境及古行为习性

包括恐龙足迹在内的脊椎动物足迹化石的保存需要一定的特殊条件, 只有湿度、黏度、颗粒度适中的底质环境才最适合足迹保存<sup>[16]</sup>。如果底质潮湿较软, 恐龙踩上离开之后, 周围的泥质会迅速回填, 足迹形态就会荡然无存。如果底质较硬, 恐龙行走后无法留下印痕。恐龙留下足迹后, 持续暴露在空气中硬化, 然后快速地泥沙回填, 足迹才能完美地保存下来<sup>[32,41]</sup>。因此在经常性出露水面的滨湖、滨海和河岸环境才更有利于足迹化石的保存。与骨骼化石相比, 足迹化石代表原地信息, 具有重要的生态学意义。

##### 4.1 乌尔禾地区恐龙足迹保存状态及古环境

恐龙足迹保存在灰绿色细粒砂岩层面上, 共有两层凹型足迹。行迹T1保存在上面一层, 其中T1-3R保存较好(图3(a)), 其余足迹被后期风化破坏, 说明当时足迹形成时底质适中, 足迹形成之后又在空气中暴露较长时间, 固化, 之后水面上升迅速被泥沙回填。行迹T2、T3以及I-1R和I-2R保存在下面一层, 其中T2和I-1R足迹保存完美, 印痕较深, T2-5R和T2-6L保存最好(图5), T2-7R被后期风化破坏。T3和I-2R印痕较浅(图2(b)), 足迹不太明显。足迹的保存情况表明行迹T2和I-1R形成时底质环境和T1一样, 而T3和I-2R形成时, 底质已经在空气中暴露一段时间, 逐渐变硬, 恐龙行走在底质上, 留下的印迹较浅。足迹层面上可以见到明显地呈弯曲状

表3 乌尔禾黄羊泉水库足迹点跟垫亚洲足迹(*A. pulvinicalx*)测量参数

Table 3 The paramaters of *A. pulvinicalx* in the Huangyangquan Reservoir, Urho

足迹 编号	足迹			II-III-IV		趾垫式 II-III-IV	趾间角			趾尖三角形			步长		
	长 (cm)	宽 (cm)	宽/长	长 (cm)	宽 (cm)		II-III	III-IV	II-IV	长 (cm)	宽 (cm)	长/宽 (M)	单步长 (cm)	复步长 (cm)	步幅 角
T2-5R	21.0	18.0	0.86	11.0-18.0-13.0	3.0-1.0-2.5	?-3-?	24.81°	22.75°	47.56°	8.0	17.5	0.46			
T2-6L	27.0	20.0	0.74	14.0-20.0-14.0	4.0-4.0-4.1	3-3-3	22.60°	28.81°	51.40°	9.1	16.9	0.54	83.2		172.0°
T2-7R	18.0	10.0		12-?-?	3.5-3.0-?								76.5	160	
T3-8L	24.0	20.0	0.83	10.0-14.0-10.0	4.0-4.0-3.0		55.14°	24.16°	79.30°	6.0	18.5	0.32			
T3-9R	25.0	18.0	0.72	11.0-14.0-10.0	4.0-4.0-3.0	3-3-2?	26.33°	20.30°	46.63°	7.0	16.0	0.44	81.5		

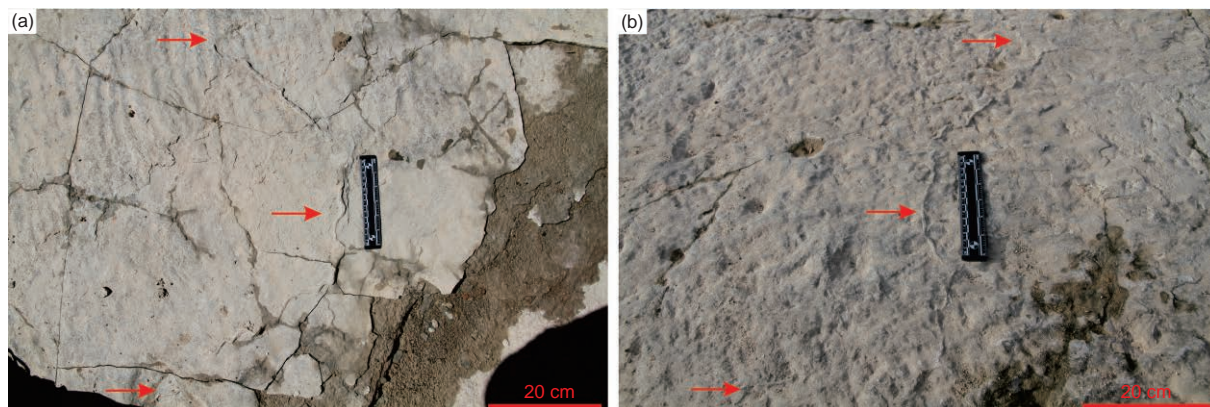


图6 乌尔禾黄羊泉水库足迹层面对称波痕和虫迹。(a) 对称波痕和虫迹2; (b) 虫迹1. 红色箭头指示虫迹的位置  
**Figure 6** The symmetrical ripple marks and invertebrate traces in the Huangyangquan Reservoir, Urho. (a) The symmetrical ripple marks and invertebrate trace 2; (b) invertebrate trace 1. The red arrows indicate the invertebrate traces

的对称波痕, 波峰的走向约30°~60°(图2, 6), 对称波痕是双向水流形成的产物, 在滨浅湖环境中常见. 层面上还可见到明显的虫迹(图6), 虫迹主要有两条, 为爬行迹, 呈蠕虫状, 虫迹1长约150 cm, 宽0.4 cm, 分叉; 虫迹2长约90 cm, 宽0.6 cm, 分叉. 无脊椎动物爬行迹通常代表较浅的水生环境, 是在底质没有完全固结的状态下形成的. 足迹层上下岩性整体为砂岩-泥岩互层(图1), 代表了乌尔禾地区在早白垩世处于水面反复震荡时期. 杨钟健等人<sup>[18]</sup>通过对乌尔禾翼龙动物群赋存地层以及化石埋藏特征的研究, 认为早白垩世乌尔禾地区整体是湖相环境, 化石的埋藏跟随着湖面的变化而变化. 因此我们认为本研究的足迹化石形成于湖水较浅的滨浅湖环境, 造迹者行走在未完全固化的砂质地面, 行迹T2和I-1R形成时间最早, 其次为T3和I-2R, 最后是行迹T1和I-3、I-4.

#### 4.2 恐龙的行走速度和体长的估算

兽脚类行迹一般近似一条直线, 具有较长的复步长和较高的步幅角, 速度越快, 步幅角越大(接近180°)、复步长越长<sup>[32]</sup>. 根据我们实测数据(表1和3), 可以根据后足足迹长度初步推测造迹者的臀高和身体长度. 目前应用最广的造迹者臀高的计算方法是Alexander<sup>[29]</sup>通过对大量现生生物(鸟类、人类、马、大象、哺乳动物)的观察得出造迹者的臀高( $h$ )约为后足足迹长度( $FL$ )的4倍(不管是两足还是四足行走), 即 $h \approx 4FL$ . 根据兽脚类的臀高可以进一步计算体长( $BL$ ),  $BL \approx 2.63h$ <sup>[30,31]</sup>. 根据公式得出牛氏亚洲足迹造迹者的臀高为2.24 m, 体长为5.89 m(采用T1-3R足长), 属于较

大型的兽脚类恐龙. 跟垫亚洲足迹造迹者的臀高为0.96 m, 体长为2.52 m(采用T2-5R和6L足长平均值), 根据臀高和复步长可进一步计算恐龙的行走速度( $V$ ). 根据恐龙行迹的复步长和足迹长度得出<sup>[29]</sup>

$$V = 0.25g^{0.5}SL^{1.67} / (h)^{1.17}, \quad (1)$$

其中,  $g$ 为重力加速度(取值9.8 m/s<sup>2</sup>),  $SL$ 为复步长(m),  $h$ 为臀高(m)<sup>[29]</sup>. 根据表1和3的数据, 可以推断行迹T1造迹者的速度为8.14 km/h, 行迹T2造迹者的速度为6.48 km/h. 此外, Alexander<sup>[29]</sup>提出可以通过相对复步长的大小来推测恐龙行走的速度, 即复步长( $SL$ )与臀高 $h \approx 4FL$ 的比值. 一般 $SL/4FL \leq 2$ 为正常行走,  $2 < SL/4FL < 2.9$ 为小跑,  $SL/4FL \geq 2.9$ 为奔跑. 根据公式得到行迹T1的相对复步长为1.48, 行迹T2的相对复步长为1.67, 两者都处于正常行走状态. 行迹T1的步幅角为162°, 行迹T2的步幅角为172°, 都小于180°, 也符合正常行走的特征. Thulborn<sup>[26]</sup>曾给出一个更精确的速度计算公式:

$$V = [gh(SL / 1.8h)^{0.25}]^{0.5}, \quad (2)$$

这个公式更适合于计算快速奔跑恐龙的速度, 本研究描述的足迹速度都很慢, 因此采用Alexander给出的速度计算公式.

#### 5 结论

(1) 乌尔禾下白垩统吐谷鲁群胜金口组黄羊泉水库地点的兽脚类足迹共有3条行迹和4个孤立足迹, 识别出大型和中型两种类型.

(2) 依据大型三趾型足迹的形态学特征, 命名了亚

洲足迹一新种: 牛氏亚洲足迹(*Asianopodus niui* ichnosp. nov.), 是目前世界上发现的最大的亚洲足迹, 是已报道的最大亚洲足迹长的1.5倍。

(3) 依据中型三趾型足迹的形态特征, 将其归入已知的跟垫亚洲足迹。

(4) 黄羊泉水库足迹层位于胜金口组的上部, 足迹

层面还可见到无脊椎动物的爬行迹和对称波痕。足迹造迹者的相对复步长均小于2, 说明当时两种足迹类型的造迹者都处于湖边漫步状态。

(5) 根据初步的估算, 牛氏亚洲足迹的造迹者体长可长达5.89 m, 属于较大型兽脚类恐龙, 而跟垫亚洲足迹造迹者的体长约为2.52 m。

**致谢** 感谢中国科学院古脊椎动物与古人类研究所向龙、周红娇、李岩、张鑫俊、陈鹤及中国地质大学(北京)王俊霞等, 以及足迹化石的发现者牛春旺先生在野外考察和数据测量等方面的大力支持和帮助; 感谢中国科学院古脊椎动物与古人类研究所的Paul Rummy对英文摘要的修改以及匿名审稿专家提出的修改意见。

## 参考文献

- Hitchcock E. Final Report on the Geology of Massachusetts. Amherst: Adams and Butler, 1841. 1–831
- Sarjeant W A S. Fossil tracks and impressions of vertebrates. In: Frey R W, ed. The Study of Trace Fossils. New York: Springer-Verlag, 1975. 283–324
- Chardin P T D, Young C C. On some traces of vertebrate life in the Jurassic and Triassic beds of Shansi and Shensi. Acta Geol Sin-Engl Ed, 1929, 8: 131–133
- Kuhn O. Die Fährten der Vorzeitlichen Amphibien und Reptilien. Bamberg: Verlagshaus Meisenbach KG, 1958. 1–64
- Young C C. Fossil footprints in China. Vertebr Palasiat, 1960, 4: 53–66
- Young C C. Note on some fossil footprints in China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 1943, 13: 151–154
- Young C C. Two footprints from the Jiaoping coal mine of Tungchuan Shensi (in Chinese). Vertebr Palasiat, 1966, 10: 68–70, 72 [杨钟健. 陕西铜川的足印化石. 古脊椎动物学报, 1966, 10: 68–70, 72]
- Young C C. Footprints from Jinghong, Yunnan (in Chinese). Vertebr Palasiat, 1979, 17: 114–115, 179–180 [杨钟健. 云南西双版纳傣族自治州的足印化石. 古脊椎动物学报, 1979, 17: 114–115, 179–180]
- Young C C. Footprints from Luanping, Hebei (in Chinese). Vertebr Palasiat, 1979, 17: 116–117, 181 [杨钟健. 河北滦平县足印化石. 古脊椎动物学报, 1979, 17: 116–117, 181]
- He Q, Xing L D, Wang X L, et al. Sedimentary environment of Late Cretaceous theropod tracksite in Qiyun Mountain, Anhui Province (in Chinese). Geol Bull Chin, 2017, 36: 1506–1513 [何情, 邢立达, 王晓丽, 等. 安徽齐云山晚白垩世兽脚类恐龙足迹点沉积环境. 地质通报, 2017, 36: 1506–1513]
- Xing L D, Buckley L G, Lockley M G, et al. A new bird track, *Koreanaornis lii* ichnosp. nov., from the Lower Cretaceous Hekou Group in the Lanzhou-Minhe Basin, Gansu, northwest China, and implications for Early Cretaceous avian diversity. Cretac Res, 2016, 66: 141–154
- Li Y X, Zhang Y X. Early Middle Jurassic dinosaur footprints from Zizhou County, Shaanxi, China. Vertebr Palasiat, 2017, 55: 276–288
- Xing L D, Lockley M G, Zhang J P, et al. First Early Jurassic ornithischian and theropod footprint assemblage and a new ichnotaxon *Shenmuichnus wangi* ichnosp. nov. from Yunnan Province, southwestern China. Hist Biol, 2015, 28: 721–733
- Wang B P, Li J J, Bai Z Q, et al. Research on dinosaur footprints in Zizhou, Shaanxi Province, China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2016, 90: 1–18
- Xing L D, Lockley M G, Romilio A. An unusual dinosaur track assemblage from the Jurassic-Cretaceous boundary, Anning formation, Lufeng Basin, China. Hist Biol, 2019, doi: 10.1080/08912963.2019.1642335
- Li J J. Footprints of Mesozoic Reptilians and Avians-Palaeovertebrata Sinica Fascicle 8 (Serial No. 12), Volume II (Amphibians, Reptilians, and Avians) (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015. 1–273 [李建军. 中生代爬行类和鸟类足迹——中国古脊椎动物志第二卷(两栖类 爬行类 鸟类)第八册(总第十二册). 北京: 科学出版社, 2015. 1–273]
- Young C C. On a new pterosaurian from Sinkiang, China. Vertebr Palasiat, 1964, 8: 221–256
- Young C C, Dong Z M, Ye X K. Pterosaurian Fauna from Wuerho, Sinkiang—Reports of Paleontological Expedition to Sinkiang (II) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1973. 1–52 [杨钟健, 董枝明, 叶祥奎. 乌尔禾翼龙动物群—新疆古生物考察报告(二). 北京: 科学出版社, 1973. 1–52]
- Wang X L, Kellner A W A, Jiang S X, et al. Egg accumulation with 3D embryos provides insight into the life history of a pterosaur. Science, 2017, 358: 1197–1201
- Wang X L, Kellner A W A, Jiang S X, et al. Sexually dimorphic tridimensionally preserved pterosaurs and their eggs from China. Curr Biol, 2014, 24: 1323–1330
- Xing L D, Avanzini M, Lockley M G, et al. Early Cretaceous turtle tracks and skeletons from the Junggar Basin, Xinjiang, China. Palaios, 2014, 29:

137–144

- 22 Xing L D, Lockley M G, McCrea R T, et al. First record of *Deltapodus* tracks from the Early Cretaceous of China. *Cretac Res*, 2013, 42: 55–65
- 23 Xing L D, Lockley M G, Klein H, et al. Dinosaur, bird and pterosaur footprints from the Lower Cretaceous of Wuerhe asphaltite area, Xinjiang, China, with notes on overlapping track relationships. *Palaeoworld*, 2013, 22: 42–51
- 24 He Q, Xing L D, Zhang J P, et al. New Early Cretaceous pterosaur-bird track assemblage from Xinjiang, China: Palaeoethology and palaeoenvironment. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 2013, 87: 1477–1485
- 25 Zhao X J. Mesozoic Vertebrate Fossil Strata in Northern Sinkiang-Reports of Paleontological Expedition to Sinkiang (IV) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 63–77 [赵喜进. 新疆北部中生代脊椎动物化石地层——新疆古生物考察报告(四). 北京: 科学出版社, 1980. 63–77]
- 26 Thulborn T. *Dinosaur Tracks*. London: Chapman and Hall, 1990. 1–410
- 27 Weems R E. A re-evaluation of the taxonomy of Newark supergroup saurischian dinosaur tracks, using extensive statistical data from a recently exposed tracksite near Culpeper, Virginia. In: Sweet P C, ed. *Proceedings 26th Forum on the Geology of Industrial Minerals*. Virginia: Virginia Division of Mineral Resources Publication, 1992, 119. 113–127
- 28 Lockley M G. New perspectives on morphological variation in tridactyl footprints: Clues to widespread convergence in developmental dynamics. *Geol Quart*, 2009, 53: 415–432
- 29 Alexander R M N. Estimates of speeds of dinosaurs. *Nature*, 1976, 261: 129–130
- 30 Henderson D. Footprints, trackways, and hip heights of bipedal dinosaurs—Testing hip height predictions with computer models. *Ichnos*, 2003, 10: 99–114
- 31 Xing L D, Harris J D, Sun D H, et al. The earliest known deinonychosaur tracks from the Jurassic-Cretaceous boundary in Hebei Province, China. *Acta Palaeontol Sin*, 2009, 48: 662–671
- 32 Lockley M G. *Tracking Dinosaurs: A New Look at an Ancient World*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 1–238
- 33 Matsukawa M, Shibata K, Kukihara R, et al. Review of Japanese dinosaur track localities: Implications for ichnotaxonomy, paleogeography and stratigraphic correlation. *Ichnos*, 2005, 12: 201–222
- 34 Hitchcock E. An attempt to name, classify and describe the animals that made the fossil footmarks of New England. In: *Proceedings of the 6th Annual Meeting of Association of American Geologists and Naturalists*, New Haven, 1845. 23–25
- 35 Li J J, Bateer, Zhang W H, et al. A new type of dinosaur tracks from Lower Cretaceous of Chabu, Otog Qi, Inner Mongolia (in Chinese). *Acta Palaeontol Sin*, 2006, 45: 221–234 [李建军, 巴特尔, 张维虹, 等. 内蒙古查布地区下白垩统巨齿龙足印化石. *古生物学报*, 2006, 45: 221–234]
- 36 Zeng X Y. The dinosaur footprints found in the red bed of Yuanling-Mayang Basin (in Chinese). *Hunan Geol*, 1982, 1: 57–58, 104 [曾祥渊. 湘西北沅麻盆地红层中发现的恐龙足印化石. *湖南地质*, 1982, 1: 57–58, 104]
- 37 Li J J, Bai Z Q, Wei Q Y. The Lower Cretaceous Dinosaur Footprints in Otog Qi, Inner Mongolia (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2011. 1–109 [李建军, 白志强, 魏青云. 内蒙古鄂托克旗下白垩统恐龙足迹. 北京: 地质出版社, 2011. 1–109]
- 38 Olsen P E, Smith J B, McDonald N G. Type material of the type species of the classic theropod footprint genera *Eubrontes*, *Anchisauripus*, and *Grallator* (Early Jurassic, Hartford and Deerfield Basins, Connecticut and Massachusetts, U.S.A.). *J Vertebr Paleontol*, 1998, 18: 586–601
- 39 Li J J, Bai Z Q, Lockley M G, et al. Dinosaur tracks in Wulatezhongqi, Inner Mongolia (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2010, 84: 723–742 [李建军, 白志强, Lockley M G, 等. 内蒙古乌拉特中旗恐龙足迹研究. *地质学报*, 2010, 84: 723–742]
- 40 Sullivan C, Hone D W E, Cope T D, et al. A new occurrence of small theropod tracks in the Houcheng (Tuchengzi) formation of Hebei Province, China. *Vertebr Palasiat*, 2009, 47: 35–52
- 41 Paik I S, Kim H J, Lee Y I. Dinosaur track-bearing deposits in the Cretaceous Jindong formation, Korea: Occurrence, palaeoenvironments and preservation. *Cretac Res*, 2001, 22: 79–92

Summary for “新疆准噶尔盆地发现世界最大的亚洲足迹”

## The largest species of *Asianopodus* footprints from Junggar Basin, Xinjiang, China

Yang Li<sup>1,2,3</sup>, Shunxing Jiang<sup>1,2</sup> & Xiaolin Wang<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China;

<sup>2</sup> Center for Excellence in Life and Paleoenvironment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China;

<sup>3</sup> College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

\* Corresponding author, E-mail: wangxiaolin@ivpp.ac.cn

A discovery has been made where thirteen footprints, two invertebrate traces and symmetrical ripple marks were found in a greyish green calcareous fine sandstone bed. The discovery was found in the Lower Cretaceous Shengjinkou Formation of Urho area, northwestern Junggar Basin, Xinjiang and it formed three trackways and four isolated tracks. Classic methods were used to study the dinosaur footprints in the Urho area, which included measuring the stratigraphic sections and the footprint parameters in the field. Similar standards of measurements were used for the measurement of footprint length and width, digit length and width, the divarication between digits, the length and width of anterior triangle, pace and stride lengths. In addition, photos of each footprint were taken and the orientation and distance between the neighbored tracks were measured. Distributions and outlines of the footprints were drawn in the computer by using CorelDRAW. On the other hand, silicone rubber demould was used for the well preserved specimens for a detailed research and from the detailed study of the footprints and trackways, two different types of theropod footprints were identified. The large three-toed footprints were a new species, named *Asianopodus niui* ichnosp. nov., which are large sized tridactyl (47.0–56.0 cm long and 31.0–42.0 cm wide, width/length between 0.66–0.75), the divarication between digits II and IV is 49.00°–55.34°, subsymmetrical, digit III is slightly longer than digit II, but more longer than digit IV, the length/width of anterior triangle between 0.34–0.37, V-shape tracks with a distinct bulbous heel impression, without manus and tail impressions, the phalangeal formula is 3-3-2, the pace length is between 164–180 cm, the stride length is 328–336 cm. It is significant to note that this is the largest *Asianopodus* footprints that have been discovered. The medium-sized tracks belong to *Asianopodus pulvinicalx*, which are middle sized tridactyl (21.0–27.0 cm long and 18.0–20.0 cm wide, width/length between 0.72–0.86), the divarication between digits II and IV is 46.63°–51.40°, subsymmetrical, digit III is more longer than digit II and digit IV, the length/width of anterior triangle between 0.44–0.54, V-shape tracks with a distinct bulbous heel impression and without manus and tail impressions, the phalangeal formula is 3-3-3, the pace length is between 76.5–83.2 cm, the stride length is 160 cm. According to the footprint length, pace and stride length, relative stride length of the tracks, we calculated that the body length of *A. niui* ichnosp. nov. is 5.89 m and the speed is 8.14 km/h, while the body length of *A. pulvinicalx* is 2.52 m and speed is 6.48 km/h. Based on the symmetric ripple marks and invertebrate traces on the surface of the footprints layer, we inferred that both the trackmakers of the Urho dinosaur footprints walked in the shore and shallow lacustrine environment.

***Asianopodus*, dinosaur trackways, Lower Cretaceous, Junggar Basin, Urho Xinjiang**

doi: 10.1360/TB-2019-0513