

山东诸城地区蜥脚类恐龙足迹研究

张艳霞¹⁾, 陈军²⁾, 江小均³⁾

1) 诸城市恐龙文化研究中心, 山东诸城, 262200; 2) 山东省地质科学研究所, 济南, 250013;

3) 昆明理工大学国土资源工程学院地球科学系, 昆明, 650093

内容提要:蜥脚类恐龙是中生代时期陆地上最大的动物, 作为广泛分布于侏罗纪和白垩纪的一种进化十分成功的恐龙, 蜥脚类足迹也是分布较广, 从早侏罗世到晚白垩世的地层中都有发现。诸城地区南部皇龙沟莱阳群、北部张祝河湾及棠棣戈庄大盛群中发现了三处早白垩世时期数量不等的恐龙足迹化石, 这三处化石点都发现了蜥脚类的恐龙足迹化石。诸城地区三处的蜥脚类恐龙足迹之间有什么异同呢? 这些足迹的造迹者都属于同一种蜥脚类恐龙吗? 本文在大量的数据统计基础上, 根据前后足的面积比对蜥脚类足迹进行了初步分类, 推测早白垩世早期的皇龙沟及早白垩世晚期的棠棣戈庄都至少生活有两种不同的蜥脚类恐龙, 证实了蜥脚类群居生活的特性。对三处不同时期蜥脚类恐龙体型的对比总结出蜥脚类体型趋小化的演化趋势, 并分析认为环境的变化是演化的动力机制。对白垩纪恐龙物种的更替, 古环境变化等多方面问题进行了探讨。

关键词: 诸城; 蜥脚类; 足迹化石; 早白垩世; 分类

恐龙是一种已经灭绝的大型陆生爬行动物, 最早出现于三叠纪后期, 在侏罗纪和白垩纪时期达到了鼎盛, 占据了各个大陆, 在白垩纪末期灭亡。恐龙一直是古生物研究领域的热点, 而恐龙足迹作为恐龙学研究的一个分支, 也成为近年来的研究热点。

恐龙足迹化石是造迹恐龙在湿度、粘度、颗粒度均适中的地表行走时留下的痕迹, 经过日晒干燥固定成型, 之后在没有被破坏的情况下被后期的沉积物掩埋, 经过长期的地质作用形成化石。由于恐龙足迹化石是恐龙在生存时期活动的真实写照, 它不仅很好地反映出造迹恐龙的足部形态特征, 通过恐龙行迹还可以了解恐龙的行走方式、运动姿态, 估算恐龙的臀高、身长以及运动速度等 (Lockley, 1991, 1999; 吕洪波等, 2004)。另外, 通过足迹的保存状态及化石赋存层的特征还可以恢复古地理、古环境及古气候等 (Lockley, 1986; Lockley et al., 1994a, 2012)。

有“中国龙城”之称的山东诸城, 是我国重要的以大型鸭嘴龙类为代表的古脊椎动物化石产地, 是闻名世界的“恐龙化石宝库”。诸城地区恐龙化石分布面积达 1600 km², 不仅拥有种类丰富、数量巨大

的晚白垩世恐龙骨骼化石 (柳永清等, 2010; 旷红伟等, 2013, 2014; 安伟等, 2016), 还在其南部皇龙沟莱阳群、北部张祝河湾及棠棣戈庄大盛群中发现了三处早白垩世时期数量不等的恐龙足迹化石 (李日辉等, 2000, 2001; 柳永清等, 2001; 许欢等, 2013; 王宝红等, 2013; Xing Lida et al., 2010)。前人在诸城恐龙足迹化石的研究上取得了丰富的成果, 对三处化石点的恐龙足迹形态学、分类学、埋藏学及古地理、古环境和古生态等方面进行了研究 (李日辉等, 2000, 2001; 柳永清等, 2011; 许欢等, 2013; 王宝红等, 2013; Xing Lida et al., 2010; 李素等, 2012; 何碧竹等, 2012; Lockley et al., 2015)。这三处化石点都发现了蜥脚类的恐龙足迹化石 (许欢等, 2013; Xing Lida et al., 2010; 王宝红等, 2013; Lockley et al., 2015), 特别是诸城的皇龙沟恐龙足迹群为世界上最大的白垩纪恐龙足迹化石点 (Lockley et al., 2015), 保存有数量众多的蜥脚类恐龙足迹。

以往对诸城早白垩世恐龙足迹化石的分布特征、恐龙的生活习性、运动行为、形成机制及各个足迹化石点的古环境、古地理等的研究分别已经取得了重要的研究成果, 但是有关于三处恐龙化石点的

注: 本文为中国地质调查局项目 (编号: DD15-034)、国家自然科学基金资助项目 (编号: 41272021, 41372109, 90914003) 的成果。

投稿日期: 2016-07-03; 改回日期: 2017-02-17; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.02.015

作者简介: 张艳霞, 女, 1982年生。硕士研究生, 馆员, 主要从事中生代恐龙化石的研究。Email: yanxiazhangzxw@126.com。通讯作者, 江小均, 男, 1985年生。讲师, 主要从事中生代地质研究。Email: cagsjiang@126.com。

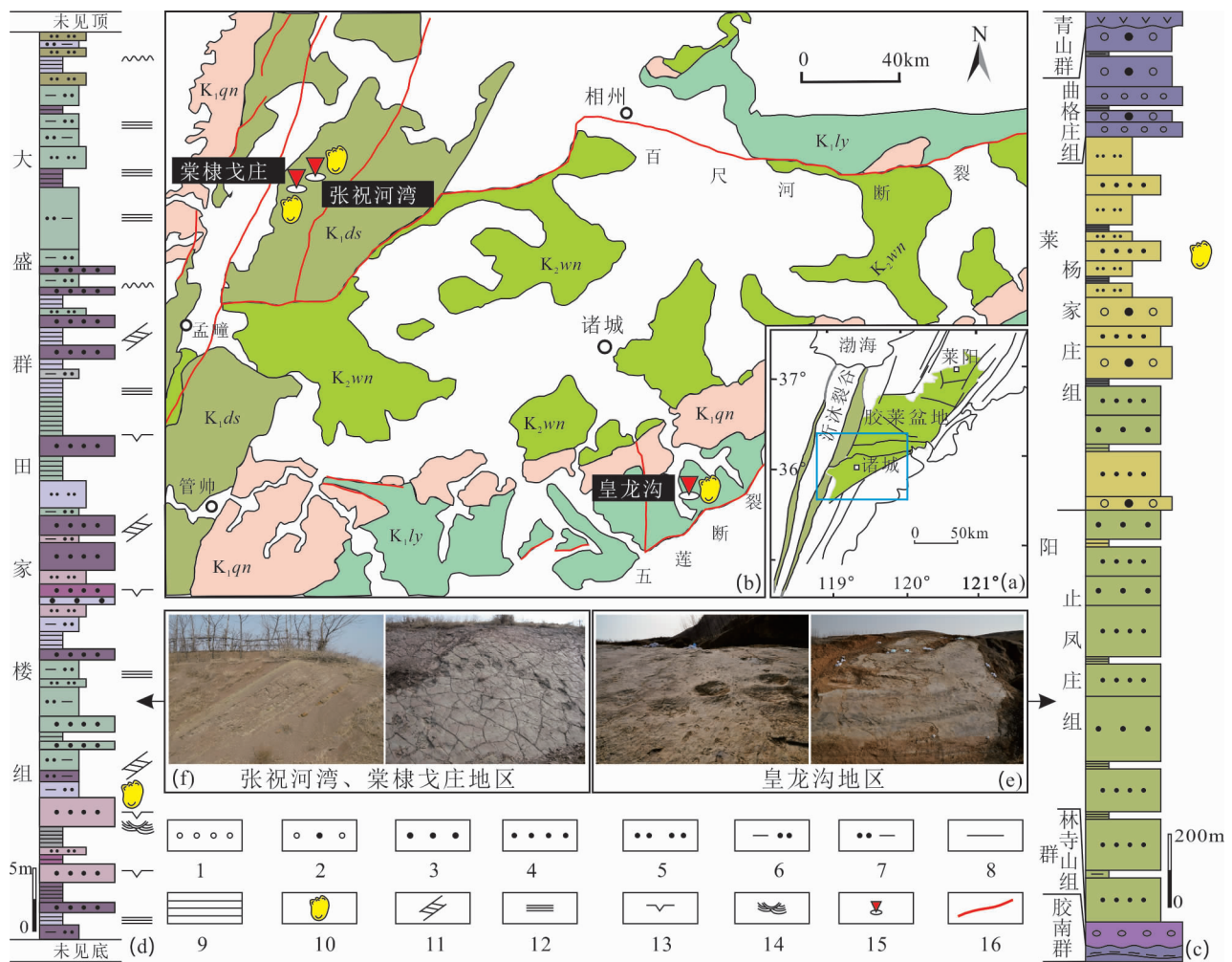


图 1 山东诸城盆地地质及恐龙足迹化石产出层位特征

Fig. 1 Regional geology and the horizon of dinosaur footprints in Zhucheng Basin, Shandong

(a) 据张岳桥等, 2008, 有修改; (b) 据许欢等, 2013, 有修改; (c) 山东省区域地质志, 1991; (d) 为作者实测。 K_1ly —早白垩世莱阳群; K_1qn —早白垩世青山群; K_1ds —早白垩世大盛群; K_2wn —晚白垩世王氏群; 1—砾岩; 2—砂砾岩; 3—中砂岩; 4—细砂岩; 5—粉砂岩; 6—泥质粉砂岩; 7—粉砂质泥岩; 8—泥岩; 9—页岩; 10—恐龙足迹; 11—楔状交错层理; 12—平行层理; 13—泥裂; 14—槽状交错层理; 15—恐龙足迹化石点; 16—断裂构造

(a) From Zhang Yueqiao, et al., 2008, has modification; (b) from Xu Huan, et al., 2013, has modification; (c) Regional Geology of Shandong Province; 1991; (d) measured by writers. K_1ly — the Lower Cretaceous Laiyang Group; K_1qn — the Lower Cretaceous Qingshan Group; K_1ds — the Lower Cretaceous Dasheng Group; K_2wn — the Upper Cretaceous Wangshi Group. 1— conglomerate; 2— glutenite; 3— medium sandstone; 4— fine sandstone; 5— siltstone; 6— argillaceous siltstone; 7— silty mudstone; 8— mudstone; 9— shale; 10— dinosaur footprints; 11— wedge-shaped cross bedding; 12— parallel bedding; 13— mud cracks; 14— trough cross-bedding; 15— location of dinosaur footprints fossil; 16— fault

对比研究还较薄弱, 三处恐龙足迹化石点恐龙足迹的种类有何异同? 诸城地区三处的蜥脚类恐龙足迹之间有什么异同呢? 从下白垩统莱阳群杨家庄组的皇龙沟到大盛群田家楼组的张祝河湾、棠棣戈庄, 均发现有蜥脚类恐龙足迹, 这三处恐龙化石点的蜥脚类恐龙足迹也会是同一种造迹恐龙留下的吗? 笔者等在前人研究的基础上, 对三处的蜥脚类恐龙足迹

进行了较为全面系统的数据测量及数据对比分析, 对诸城地区早白垩世蜥脚类足迹的种类进行了初步分类, 并探讨了其演化方向及原因。

1 地质背景

晚中生代的侏罗纪—白垩纪, 全球进入了一个以伸展构造为主的演化期, 在这种背景下, 位于华北

克拉通东部,沂沭断裂带东侧的胶莱盆地成为这个时期中国东部典型的陆内伸展断陷沉积盆地之一(图 1a),并于白垩纪充填了一套厚度巨大的陆相碎屑沉积(施炜等,2003;张岳桥等,2008),由下白垩统莱阳群、青山群、大盛群和上白垩统王氏群组成,角度不整合于太古界胶东群、古元古界荆山群、粉子山群和新元古界蓬莱群之上,上覆古近系和第四系,亦为角度不整合接触。诸城地区位于胶莱盆地南部,白垩系发育齐全(图 1b),其中的莱阳群沉积厚度较大,最大厚度可超过 2500m,为莱阳期胶莱盆地的沉降中心(陆克政等,1994;张岳桥等,2008),是盆地形成初期的产物,分布广泛,向东延入黄海,目前在黄海近岸的灵山岛上就有良好出露(吕洪波等,2011;钟建华,2012;李守军等,2017),其自下而上可分为瓦屋夼组、林寺山组、止凤庄组、水南组和龙旺庄组(莱阳地区)或杨家庄组(诸城地区)、曲格庄组和法家莹组(刘明渭等,1994),诸城地区见到中间 4 个组(图 1c、e),整体呈现出粗一细一粗的韵律结构。青山群为一套火山岩,夹少量紫红色砂砾岩。大盛群主要发育在沂沭断裂地堑内,为一套紫红色河流—湖泊相粗碎屑岩系,与青山群呈指状交叉对应关系(李庆平等,1992;方晓思等,1998;李守军,1998;刘明渭等,2003),自下而上进一步划分为马郎沟组、田家楼组、寺前村组和孟瞳组,其中马郎沟组与寺前村组均以灰紫色砂砾岩为主,田家楼组(图 1d、f)与孟瞳组则以滨浅湖相砂岩、粉砂岩及泥岩为主。王氏群沉积物以紫色、砖红色砾岩和砂岩的频繁韵律为特征,局部夹泥灰岩,是一套辫状河—冲积扇相为主的沉积相组合序列,诸城地区厚度大于 3000m,产出丰富恐龙骨骼化石(旷红伟等,2013)。

2 材料与方法

蜥脚类恐龙是中生代时期陆地上最大的动物,作为广泛分布于侏罗纪和白垩纪的一种进化十分成功的恐龙,其足迹也是分布较广,从早侏罗世到晚白垩世的地层中都有发现。蜥脚类恐龙为四足行走,其足迹特征是,前足为椭圆形、半圆形或月牙形,后足为椭圆形或近圆形。

前人对蜥脚类恐龙足迹的分类做了大量的研究工作。当足迹保存完整时,通常根据恐龙足迹的形态特征及大小等来区分足迹的种类;但当足迹特征保存状况相对较差时,前后足的比值模式可以成为区分不同蜥脚类恐龙的方法(Farlow, 1992; Lockley

et al., 1994c; Wilson and Carrano, 1999; Vila et al., 2013)。根据现有认识认为蜥脚类恐龙前后足迹面积的比一般为 1: 2 (Santos et al., 1994)、1: 4 或 1: 5 (Lockley et al., 1990);同时也有学者发现,白垩纪时期蜥脚类恐龙前后足迹的面积比值相对较大(彭冰霞,2003)。

由于诸城地区多数蜥脚类恐龙足迹并非处于完好的保存状态,有的足迹甚至为幻迹,所以仅通过外部形态描述来辨别造迹恐龙是否为同一种恐龙是十分困难的。因此本文将在前人研究的基础上,对诸城蜥脚类恐龙足迹的大量数据测量,计算获得每行迹中前后足的平均面积比,通过将所有行迹前后足面积比对比,对其类别进行进一步辨别、归类。通过不同层位的三处恐龙化石点前后足面积比的对比,探讨分析恐龙前后足面积比发生的变化。从恐龙足迹的大小可推断造迹恐龙的臀高,臀高取为足长的 4 倍(李建军等,2006),依据臀高与体长之比约为 1: 4 (Lockley et al., 1994b)可推测造迹恐龙的大致身长。通过三处不同时期的蜥脚类的大小对比推测蜥脚类恐龙在体型方面可能的演化趋势。

在诸城地区发现的蜥脚类恐龙足迹,基本上都为圆形、椭圆形,或者近圆形、近椭圆形(例如马蹄形),圆形面积计算公式为 $S = \pi r^2$ (r 是圆形的半径)椭圆形面积计算公式为 $S = \pi \times a \times b$ (其中 a, b 分别是椭圆的半长轴,半短轴的长)。因此,计算面积比,可以简化为前后足长轴与短轴相乘后的比值,即:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\pi \times a_1 \times b_1}{\pi \times a_2 \times b_2} = \frac{\pi \times \frac{A_1}{2} \times \frac{B_1}{2}}{\pi \times \frac{A_2}{2} \times \frac{B_2}{2}} = \frac{A_1 \times B_1}{A_2 \times B_2} \quad (1)$$

S 代表足迹面积; a, b 分别是足迹的半长轴的长,半短轴的长; A, B 分别代表长轴的长,短轴的长。

3 足迹化石产出层位

皇龙沟恐龙足迹化石点位于诸城市南部皇华镇大山社区,是一处超大规模的恐龙足迹群,产于莱阳群杨家庄组上部(柳永清等,2011;许欢等,2013; Lockley et al., 2015),是目前山东地区已发现白垩系最低层位的恐龙足迹(柳永清等,2011),在近 3000 m² 的面积上分布有 2417 个恐龙足迹,其中绝大部分为兽脚类恐龙足迹,也保存了近 70 个蜥脚类恐龙足迹(图 2a、b、c)。兽脚类足迹与蜥脚类足迹存在明显的区别,兽脚类恐龙足迹一般为两足行走,

趾尖有爪;蜥脚类恐龙足迹一般为四足行走,前后足特征相似,为大象脚型。这些蜥脚类恐龙足迹形成三条行迹,行迹是指由一个运动的动物所留下的一连串连续的足迹。Lockley 等(2015)认为该化石点化石赋存层自下而上有五层,但是许欢等(2015)则给出了截然不同的解释,认为 Lockley 等所描述的五层化石层实际上为一层。

棠棣戈庄恐龙足迹化石点位于诸城市北部马庄镇,此处曝露的恐龙足迹都为蜥脚类恐龙足迹,化石主要赋存于下白垩统大盛群田家楼组紫红色细砂岩中(王宝红等,2013)(图 3)。邢立达等(Xing Lida et al.,2015)指出棠棣戈庄足迹化石点属于早白垩世大盛群田家楼组。

张祝河湾恐龙足迹化石点距离棠棣戈庄恐龙足

迹化石点仅仅 1 km,这批足迹包括了中小型蜥脚类足迹,大型鸟脚类足迹,古鸟类足迹。最初足迹化石产出层位被归为下白垩统莱阳群(Xing Lida et al.,2010),王宝红等(2013)则认为张祝河湾这套产恐龙足迹化石的地层应该为大盛群而非莱阳群。最近,邢立达等(Xing Lida et al.,2015)指出张祝河湾足迹化石产出层属于大盛群的田家楼组,与棠棣戈庄足迹化石点的时代几乎相同,比棠棣戈庄足迹化石点暴露的地层稍微老一点。

4 恐龙行迹特征描述

4.1 皇龙沟蜥脚类行迹

皇龙沟恐龙足迹化石点共识别出 3 条蜥脚类行

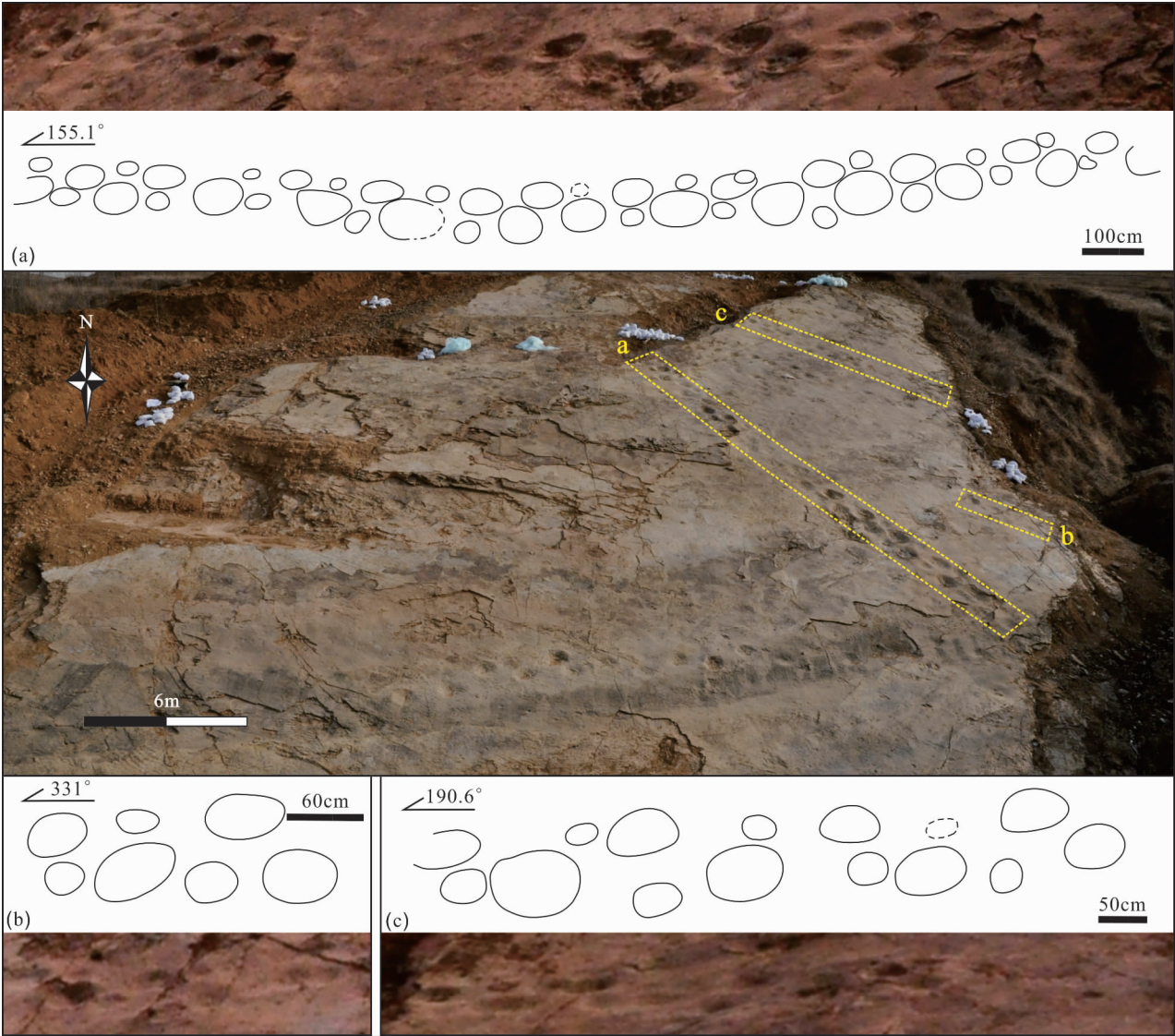


图 2 诸城皇龙沟恐龙足迹化石点的蜥脚类足迹及其行迹

Fig. 2 The sauropod footprints and tracks in track site of Huanglonggou, Zhucheng



图 3 诸城棠棣戈庄恐龙足迹分布示意图

Fig . 3 The distribution sketch map of the dinosaur footprints at Tangdigezhuang , Zhucheng

表 1 诸城皇龙沟蜥脚类恐龙足迹要素

Table 1 Elements of sauropod dinosaur footprints in track site of Huanglonggou , Zhucheng

点	号	前脚/后脚	左脚/右脚	足迹长 (cm)	足迹宽 (cm)	行迹宽 (cm)	点	号	前脚/后脚	左脚/右脚	足迹长 (cm)	足迹宽 (cm)	行迹宽 (cm)
HA	1	后	L	90	88	58.2		34	前	R	68	54	
	2	后	R	90	75			35	后	L	86	73	
	3	前	L	43	46			36	后	R	79	68	
	4	前	R	54	44			37	前	L	43	41	
	5	后	L	90	73			38	前	R	48	48	
	6	后	R	84	75			39	后	L	85	63	
	7	前	L	59	49			40	后	R	88	70	
	8	前	R	50	45			41	前	L	50	48	
	9	后	L	91	81			42	前	R	54	48	
	10	后	R	90	94			43	后	L	80	80	
	11	前	L	50	53			44	后	R	86	73	
	12	前	R	54	54			45	前	L	52	41	
	13	后	L	79	77			46	前	R	58	58	
	14	后	R	86	87			47	后	L	82	75	
	15	前	L	50	33		HB	1	后	L	60	51	43
	16	前	R	40	30			2	后	R	62	59	
	17	后	L	86	78			3	前	L	36	36	
	18	后	R	98	93			4	前	R	35	37	
	19	前	L	49	43			5	后	L	62	58	
	20	前	R	48	50		HC	7	前	R	35	30	27.6
	21	后	L	81	79			1	前	L	62	51	
	22	后	R	94	93			2	前	R	62	65	
	23	前	L	46	43			3	后	L	71	63	
	24	前	R	36	38			4	后	R	74	64	
	25	后	L	90	80			5	后	L	71	64	
	26	后	R	86	69			6	后	R	73	66	
	27	后	L	55	53			7	前	L	69	62	
	28	后	R	90	68			8	前	R	60	56	
	29	前	L	55	53			9	后	L	63	61	
	30	前	R	58	48			10	后	R	66	59	
	31	后	L	86	70			11	前	L	64	54	
	32	后	R	68	68			12	前	R	65	58	
	33	前	L	56	48			13	后	L	65	56	

迹,并对这 3 条较好的保存了前后足迹的行迹进行了数据实测(表 1)。

从现场观察和实测结果(表 1)来看,皇龙沟地区蜥脚类足迹特点是,后足较大呈椭圆形凹坑,趾端不明显,前足呈近圆形,较后足浅,部分足迹周围形成突起的脊状边缘,整体行迹宽较窄(图 2a、b、c),行迹方向多样。

HA 行迹为该足迹点最长且保存最完好的一条,位于整个足迹斜面的中上部(图 2a)。整个行迹由 22 个前足和 25 个后足足迹组成;前足多为椭圆形及马蹄形,后足为卵圆形,且后足形态较前足清晰。此行迹中恐龙足迹的前足位于后足之前,行迹靠北部分多数前后足边缘重叠,一处前后足出现完全重叠,行迹靠南部分前足和后足多分开,前足较后足远离行迹中心线。此行迹宽 58.2 cm;后足整体长大于宽,均长 84.8 cm,均宽 76.12 cm;前足均长 50.95cm,均宽 46.13 cm;前后足的平均面积比为 1:2.7。根据恐龙足迹的大小可推断造迹恐龙的臀高(Alexander,1976;李建军,2006),依据前足足迹长度计算得到的臀高为 2.04 m,依据后足足迹长度计算得到的臀高为 3.39 m。根据臀高与体长之比约为 1:4 的比例推算(Lockley et al.,1994b),得出该造迹恐龙的体长 8.16~13.56 m。

HB 行迹位于足迹层面中部,行迹长度较短,仅保存有 4 个后足和 3 个前足,皆较浅,呈椭圆形,前足和后足分开,且前足位于后足之前,前足较后足远离行迹中心线(图 2b)。此行迹宽为 43 cm;恐龙足迹后足均长 61.3 cm,均宽 56 cm;前足均长 35.3 cm,均宽 34.3 cm;前后足的平均面积比为 1:2.8。依据前足足迹长度计算得到的臀高为 1.41m,依据后足足迹长度计算得到的臀高为 2.45 m,推测该造迹恐龙的体长 5.64~9.81 m。

HC 行迹由 6 个前足和 7 个后足组成,但足迹均较浅,仅见椭圆形轮廓(图 2c)。此行迹宽为 27.6 cm,前足较后足远离行迹中心线;后足均长 69.25 cm,均宽 62 cm;前足均长 63.67 cm,均宽 57.67 cm;前后足的平均面积比为 1:1.2。依据前足足迹长度计算得到的臀高为 2.55 m,依据后足足迹长度计算得到的臀高为 2.77 m,推测该造迹恐龙的体长在 10.2~11.08 m 之间。

4.2 棠棣戈庄蜥脚类行迹

在该足迹化石点共识别出 3 条蜥脚类行迹,其中 2 条为小型造迹恐龙留下的行迹且较清晰,其中 1 条为拐弯的行迹 TA,另 1 条为直线型的行迹 TB,

第 3 条是大中型蜥脚类造迹恐龙留下的行迹 TC,其仅保存了 4 个足迹(Xing Lida et al.,2015)(表 2)。

行迹 TA,共有清晰可辨的足迹 26 个,明显的呈现四足行走,这条行迹最重要的特征为 180 度的转弯形态(Xing Lida et al.,2015)(图 4)。该行迹中后足足迹保存清晰,为卵圆形;部分前足足迹被后足叠加,且行迹宽度不稳定,变化较大,这可能与转弯这

表 2 诸城棠棣戈庄蜥脚类行迹要素
Table 2 Elements of sauropod dinosaur footprints
in track site of Tangdigezhuang, Zhucheng

点	号	前脚/后脚	左脚/右脚	足迹长 (cm)	足迹宽 (cm)
TA	1	后	R	31.0	25.5
	2	前	R	14.0	12.5
	3	后	L	27.5	23.0
	4	后	R	29.5	21.5
	5	前	R	18.0	12.0
	6	后	L	35.5	26.5
	7	后	R	24.5	23.0
	8	前	R	15.0	11.0
	9	后	L	25.5	23.0
	10	后	R	31.0	21.0
	11	前	R	17.0	10.5
	12	后	L	31.0	24.0
	13	后	R	31.0	24.5
	14	后	L	34.5	29.0
	15	后	R	32.0	22.5
	16	后	L	28.5	19.5
	17	后	R	36.0	30.5
	18	后	L	28.0	25.0
	19	后	L	32.0	27.0
	20	后	R	28.0	27.5
	21	前	R	17.0	11.0
	22	后	L	30.0	20.0
	23	后	R	31.0	23.5
	24	前	R	20.0	11.5
	25	后	L	32.0	24.5
	26	后	R	34.0	25.0
TB	1	后	R	42.0	31.0
	2	后	L	37.0	37
	3	后	R	41.0	30.5
	4	前	R	20.5	10.0
	5	后	L	41.5	28.0
	6	后	R	36.5	29.0
	7	后	L	31	26.0
	8	后	R	40.0	32.0
	9	前	R	25.5	14.0
TC	1	后	?	78	69
	2	后	?	70.5	58
	3	后	?	69.5	61
	4	后	?	65	55

一行为有关 (Xing Lida et al. ,2015)。

此行迹中,后足足迹呈椭圆形坑,足长略大于足宽,后足均长 30.6cm,均宽 24.3cm,;前足均长 17cm,均宽 11.3cm;前后足的平均面积比为 1: 3.87。足迹前方一般有 2~3 个倒 V 字形抓痕,保存良好的可以见到 3 个趾迹,各趾与趾距垫之间没有明显的界限,且整个足迹向外偏转,行迹较窄;足迹周围泥裂较为发育,偶尔穿越足迹。由于当时地表比较软,趾迹出现拖曳和被周围的基质包卷的现象(图 5a、b、c、d、e、f)(王宝红等,2013)。依据前足

足迹长度计算得到的臀高为 0.68m,依据后足足迹长度计算得到的臀高为 1.22m,推测该造迹恐龙的体长在 2.72~4.9m 之间。

行迹 TB 为短的直行迹,共有清晰可辨的足迹 9 个,呈现明显四足行走状态 (Xing Lida et al. , 2015)。这条行迹中前后足足迹保存状况不好,大部分前后足足迹显示为卵圆形,部分前足足迹被后足叠加。此行迹为中等宽度,后足均长 37.1cm,均宽 30.5cm;前足均长 22.75cm,均宽 12cm;前后足的平均面积比为 1: 3.36, (Xing Lida et al. ,2015)。

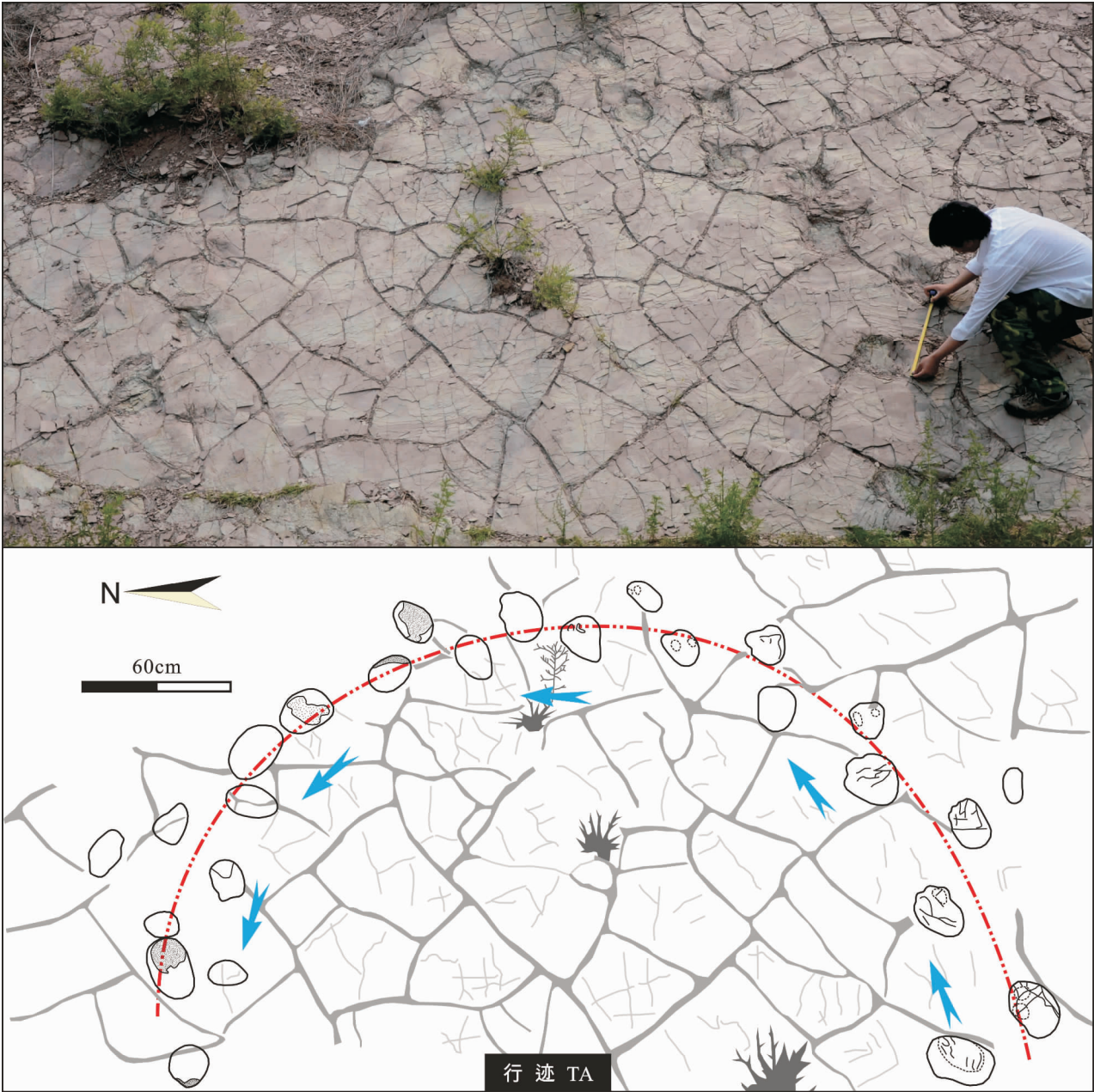


图 4 诸城棠棣戈庄蜥脚类恐龙行迹 TA 特征

Fig. 4 The characteristic of the sauropod track TA at Tangdigezhuang, Zhucheng County

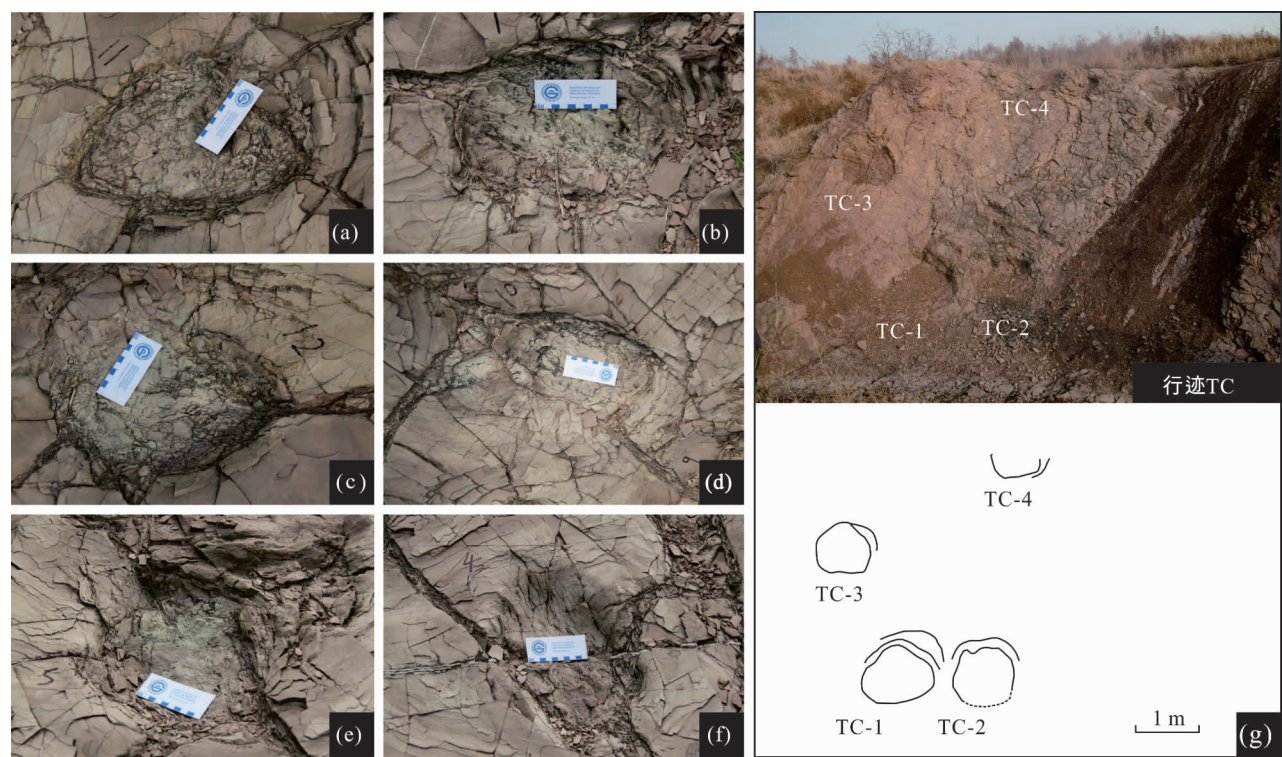


图 5 诸城棠棣戈庄行迹 TA 部分足迹特征及行迹 TC 特征

Fig. 5 Part of the footprints characteristic of the track TA and characteristic of the track TC at Tangdigezhuang, Zhucheng

依据前足足迹长度计算得到的臀高为 0.91m,依据后足足迹长度计算得到的臀高为 1.48m,推测该造迹恐龙的体长在 3.64 ~5.94m 之间。

行迹 TC,共有 4 个足迹,均被识别为后足足迹 (Xing Lida et al. ,2015),保存不完整,部分风化严重,但明显可见趾垫呈圆形分布于足迹后方 (图 5g)。其平均长为 70.8cm,均宽 60.8cm,依据其长度计算得到的臀高为 2.8m,进一步推算造迹恐龙的体长最大值约为 11.3m。

4.3 张祝河湾蜥脚类行迹

该点共发现了 4 个完整的足印,化石保存层位为下白垩统大盛群田家楼组,化石保存于灰绿色的砂岩中。这些足迹化石没有指或爪的痕迹,前后足迹皆呈椭圆形。前人 (Xing Lida et al. ,2010) 识别为两个前足足迹和两个后足足迹。此行迹中,后足均长 43.6cm,均宽 30cm;前足均长 40.5cm,均宽 28.5cm;前后足的平均面积比为 1: 1.3 (表 3)。依据前足足迹长度计算得到的臀高为 1.62m,依据后足足迹长度计算得到的臀高为 1.74m,推测该造迹恐龙的体长在 6.48 ~6.96m 之间。

5 讨论

5.1 蜥脚类造迹恐龙的分类

对皇龙沟蜥脚类恐龙行迹中的前后足面积比进行分类可知,一种类型 (HA、HB 行迹的造迹恐龙) 为前后足面积差距较大,面积比分别为 1: 2.7 和 1: 2.8,这个值接近 *Brontopodus bridi* 前后足比值的 1: 3,推测 HA、HB 行迹的造迹者可能为 *Brontopodus bridi*。另外一种 (HC 行迹的造迹恐龙) 前后足大小相似,面积比约为 1: 1.2。

由于一种蜥脚类恐龙一般只有一种行迹宽度 (Lockley et al. ,1993; Lockley et al. ,1994c; Lockley et al. ,1994d),蜥脚类行迹因种类不同而有所不同,因此蜥脚类恐龙足迹的行迹宽窄也可以作为足迹分类的依据 (Farlow, 1992)。由于恐龙异速增长 (Olsen et al. ,1998; Lockley,2009),体型的大小对行迹的宽窄有一定的影响 (Lockley et al. ,2002)。通常侏罗纪的蜥脚类恐龙行迹较窄,白垩纪的恐龙行迹较宽,即年代越新,行迹越宽 (Lockley et al. ,2002)。从这方面分析,HA、HB 行迹的宽度相对于 HC 行迹来说较宽,因此推测这里至少分布着两种蜥脚类造迹者。前人 (Lockley et al. ,2002) 研究发现,随着个体的不断增大,行迹逐渐变宽,HA 个体比 HB 个体略大,行迹也略宽,符合这一特征。这两

条行迹可能代表了同一种造迹恐龙的不同年龄段的个体,这也证实了蜥脚类恐龙群居生活的特性。

皇龙沟足迹的分布和相关的沉积结构(如波痕)显示出大部分足迹靠近湖岸线。根据前人分析可知,陆地的方向为北或北北西,湖心的方向为南或南南东,湖岸线的方向为东北东—西南西(许欢等, 2013; Lockley et al., 2015)。最长的行迹 HA 的方向为南南东—北北西,近垂直于岸线方向,但是足迹深度的变化没有规律性。我们知道,如果岩层基质成分相同,且地表平坦,那么足迹深度越向湖心方向会因含水量的增加而增大。因此,推测足迹形成时的地表可能并不是十分平坦,或者局部地表基质的性质不同。

表 3 诸城张祝河湾蜥脚类恐龙足迹要素
(据 Xing Lida 等,2010)

Table 3 Elements of sauropod dinosaur footprints in track site of Zhangzhuhewan, Zhucheng
(from Xing Lida et al., 2010)

序号	前脚/后脚	足迹长 (cm)	足迹宽 (cm)
1	前	43.6	31.8
2	前	37.4	25.2
3	后	44.5	29.1
4	后	42.7	30.9

张祝河湾化石点的造迹者可能是前后足大小相近的(ZA 的前后足面积比为 1: 1.3)一类蜥脚类恐龙。棠棣戈庄两条小型蜥脚类留下的足迹前后足面积相似(TA 的前后足面积比为 1: 3.9, TB 的前后足面积比为 1: 3.4),推测可能为一种蜥脚类造迹者。前人在对比 TA 和 TB 这两条蜥脚类行迹的宽度后认为,宽度上存在类似的变化性,推测这两条行迹的造迹恐龙可能是相同的蜥脚类造迹者(Xing Lida et al., 2015),这与我们根据前后足的面积比所得出的结论一致。TA 和 TB 行迹中前后足的比值接近 *Breviparopus* (1: 3.6) (Dutuit et al., 1980) 或者 *Parabrontopodus* (1: 4 或 1: 5) (Lockley et al., 1994c)。邢立达等(Xing Lida et al., 2015)根据行迹宽度特征及前后足的比值,推测 TA 和 TB 的造迹者可能属于 *Parabrontopodus*。张祝河湾与棠棣戈庄足迹化石赋存层所处时代及地理位置相近,推测早白垩世晚期至少有两种恐龙生活于诸城地区。

通过对诸城三处蜥脚类恐龙足迹化石点前后脚足迹特征的分析,诸城蜥脚类足迹前后比值分布在

1.2 ~ 3.9 之间,这与前人(Lockley et al., 2001)所描述白垩纪蜥脚类脚印特征基本一致。前人研究认为在蜥脚类恐龙的个体的演化上,前后脚比值具有明显的特征,通过各个时代足迹的对比分析,白垩纪蜥脚类恐龙前后足比值比侏罗纪恐龙大,即随着时代发展,蜥脚类前脚逐渐变大,和后脚之间的差距逐渐变小(彭冰霞,2003)。但诸城地区发现的蜥脚类恐龙足迹出现了相反的现象,存在白垩纪蜥脚类恐龙足迹前后脚面积比值非常小的情况(TA 的前后足面积比为 1: 3.9)。

5.2 造迹恐龙体型变化及物种的更替

早白垩世早期诸城皇龙沟恐龙足迹化石点造迹恐龙体长分别为:行迹 HA 造迹恐龙体长在 8.16 ~ 13.56m 之间,行迹 HB 造迹恐龙体长在 5.64 ~ 9.81m 之间,行迹 HC 造迹恐龙体长在 10.2 ~ 11.08m 之间。早白垩世晚期棠棣戈庄行迹 TA 造迹恐龙的体长在 2.72 ~ 4.9m 之间,行迹 TB 造迹恐龙的体长在 3.64 ~ 5.94m 之间,行迹 TC 造迹恐龙的体长最大值约为 11.3m。

张祝河湾的造迹恐龙体型造迹恐龙的体长在 6.48 ~ 6.96m 之间(表 4)。将三处蜥脚类造迹恐龙的体型对比可以发现,早白垩世早期诸城皇龙沟恐龙足迹化石点造迹恐龙较后期张祝河湾与棠棣戈庄的造迹恐龙体型普遍偏大,早白垩世晚期主要以体型较小的蜥脚类为主。这可能代表了蜥脚类恐龙的一种演化趋势,即体型越来越小的蜥脚类恐龙占主导地位。

1907 年德帕锐的“德帕锐定律”认为在古生物的每一个小的分支中,都是从小的体型开始,以后体型逐渐增大,最后达到最大体型。当它们达到最大体型的阶段,这一分支就绝灭了。这是由于身体巨大面临很多生存挑战,与身体较小的动物相比,大型

表 4 诸城地区三处恐龙足迹化石点参数对比
Table 4 Parameter comparison of the three dinosaur footprints track sites in Zhucheng area

化石点	行迹号	前后足 面积比	造迹恐龙 身长(m)	产出层位
皇龙沟	HA	1: 2.7	8.16 ~ 13.56	莱阳群 杨家庄组上部
皇龙沟	HB	1: 2.8	5.64 ~ 9.81	
皇龙沟	HC	1: 1.2	10.2 ~ 11.8	
张祝河湾	ZA	1: 1.3	6.48 ~ 6.96	大盛群田家楼组(比棠棣戈庄稍微早一点)
棠棣戈庄	TA	1: 3.9	2.72 ~ 4.9	大盛群 田家楼组
棠棣戈庄	TB	1: 3.4	3.64 ~ 5.94	
棠棣戈庄	TC	?	<11.3	

动物吃的多,繁殖的速度更慢,在面临环境挑战时更易被自然淘汰。

皇龙沟足迹化石主要保存在黄绿色砂岩中,而棠棣戈庄足迹化石赋存于紫色砂岩中,这表明皇龙沟处足迹形成时的含水量相对较大,并且气候也相对湿润。棠棣戈庄足迹化石层中的泥裂边缘多填充有钙质条带(王宝红等,2013),而皇龙沟处的泥裂边缘未发现,这也表明棠棣戈庄处的气候相对更炎热干燥。这一点与白垩纪时期气候逐渐炎热干旱(柳永清等,2011)是相符的。

诸城地区除了具有数量巨大的恐龙足迹化石之外,还发现了世界上规模最大的恐龙骨骼化石群——恐龙涧化石长廊,这里分布有恐龙骨骼化石近万块,绝大部分为大型鸭嘴龙的骨骼化石,还有虚骨龙、暴龙、角龙、蜥脚类恐龙等的骨骼化石,但是数量较少。在地理位置上,这些恐龙骨骼化石产地与恐龙足迹化石距离很近,层位上属于上白垩统王氏组,而足迹化石赋存于早白垩世地层,恐龙骨骼化石群代表了一个全然不同的、以大型鸭嘴龙类恐龙为主的恐龙动物群。这可能代表诸城地区从早白垩到晚白垩时期,恐龙的物种发生了演替。胶莱盆地发育有完整的白垩纪陆相(莱阳群—青山群—王氏群,130~65Ma)地层和沉积记录(柳永清等,2011)。早白垩世莱阳群以河流及湖泊相沉积物为主;青山群主要为中酸性火山岩、火山碎屑岩;晚白垩世王氏群的沉积物从下往上分别是:底部以冲积扇、泥石流和辫状河道相的沉积物和岩石组合为主;中部以滨浅湖与河流粉砂岩—细砂岩—泥页岩—灰质土(古土壤)韵律沉积为主;上部以冲积扇泥石流、辫状河和洪泛平原粉砂泥质砾岩—砂岩—砾岩的韵律序列为主,沉积物的变化反映了早白垩晚期火山活动频繁,造成了古气候的变化(柳永清等,2009),白垩世末期已从早白垩世相对湿润和温热的气候转变为燥热、干旱的气候。因此,推测可能气候的变化,导致了蜥脚类恐龙体型上的演化,也致使早白垩与晚白垩间的物种的更替。

前人对全球白垩纪的恐龙足迹进行了对比研究,发现早白垩世的足迹以蜥脚类与鸟脚类的足迹为特征,晚白垩世地层中蜥脚类恐龙足迹较少,但是,鸭嘴龙、暴龙和角龙的足迹增多(Lockley et al., 2012)。诸城的物种更替情况与全球恐龙足迹所显示的这种恐龙物种的变化类似,推测恐龙物种的更替这一事件在这段时间内(早白垩—晚白垩)可能具有全球性。

在张祝河湾、棠棣戈庄足迹化石点未发现植物化石,皇龙沟恐龙足迹化石点仅仅发现了一块植物的茎干化石,这与早白垩世甘肃盐锅峡的恐龙足迹化石点植物化石少见的情况类似(彭冰霞,2003),而东北地区足迹化石赋存层的植物化石丰富(Matsukawa et al., 1995)。这可能意味着诸城地区与甘肃盐锅峡地区恐龙足迹化石形成的条件相似。

6 结论

(1)诸城皇龙沟足迹点的三条蜥脚类行迹中,存在两种截然不同的前后足面积比,两条行迹中的前后足面积比接近1:3,这个值与*Brontopodus bridi*前后足比值的1:3相似,推测HA、HB可能为*Brontopodus bridi*。皇龙沟另外一条蜥脚类行迹中的前后足面积相近,比值为1:1.2;说明皇龙沟至少有两种不同的蜥脚类造迹恐龙。

棠棣戈庄两条蜥脚类行迹中前后足的面积比分别为1:3.9与1:3.4,与*Breviparopus*(1:3.6)及*Parabrontopodus*(1:4或1:5)相似。推测其可能为*Breviparopus*或者*Parabrontopodus*。

(2)将诸城三处恐龙足迹点中蜥脚类造迹恐龙的体型对比可以发现,早白垩世早期诸城皇龙沟恐龙足迹化石点造迹恐龙普遍比早白垩世晚期张祝河湾与棠棣戈庄的造迹恐龙体型大,推测诸城的蜥脚类恐龙体型上由中到大型恐龙逐渐演变为小型蜥脚类占主导。

(3)从早白垩早期到晚白垩晚期,诸城地区的气候从温暖湿润逐渐变得炎热干燥,到白垩纪晚期,气候变得异常炎热干燥,推测气候的变化致使诸城不再适宜恐龙的生存,最终导致了诸城地区早白垩蜥脚类恐龙的演化及白垩纪恐龙种类的更替。

致谢:本文写作过程中,许欢博士、王宝红硕士及中国地质大学(北京)的邢立达博士、北京自然博物馆的李建军研究员等为本文的顺利完成提供了宝贵的野外地质材料和相关帮助,在此表示感谢!同时,审稿人为本文提出了有益的修改意见,编辑们在本文的编辑过程中付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

安伟,旷红伟,柳永清,彭楠,许克民,许欢,章朋,王克柏,陈树清,张艳霞. 2016. 山东诸城晚白垩世王氏群恐龙化石层碎屑

- 锆石定年和物源示踪. 地质论评, 62(2): 453 ~ 471.
- 方晓思, 庞其清, 程政武. 1998. 山东沂沭地区白垩纪地层的新观察. 地质论评, 44(3): 302 ~ 308.
- 何碧竹, 乔秀夫, 田洪水, 张艳霞. 2012. 山东诸城早白垩世莱阳期古地震事件与恐龙迁移. 地质学报, 86(8): 1320 ~ 1330.
- 旷红伟, 许克民, 柳永清, 董超, 彭楠, 王克柏, 陈树清, 张艳霞. 2013. 胶东诸城晚白垩世恐龙骨骼化石地球化学及埋藏学研究. 地质论评, 59(6): 1001 ~ 1023.
- 旷红伟, 柳永清, 吴清资, 程光锁, 许克民, 刘海, 彭楠, 许欢, 陈军, 王宝红, 徐加林, 汪明伟, 章朋. 2013. 山东沂河裂谷带早白垩世晚期恐龙足迹群与古地理背景. 古地理学报, 15(4): 435 ~ 453.
- 旷红伟, 柳永清, 董超, 彭楠, 许欢, 王宝红, 章朋, 王克柏, 陈树清, 张艳霞. 2014. 山东诸城晚白垩世恐龙化石埋藏学研究. 地质学报, 88(8): 1353 ~ 1371.
- 李建军, 巴特尔, 张维虹, 胡柏林, 高立红. 2006. 内蒙古查布地区下白垩统巨齿龙足印化石. 古生物学报, 45(2): 221 ~ 234.
- 李庆平, 赵凤江. 1992. 山东下白垩统大盛群的建立及时代对比. 山东国土资源, 8(2): 13 ~ 21.
- 李日辉, 张光威. 2000. 莱阳盆地莱阳群恐龙足迹化石的新发现. 地质论评, 46(6): 605 ~ 610.
- 李日辉, 张光威. 2001. 山东莱阳盆地早白垩世莱阳群的遗迹化石. 古生物学报, 40(2): 252 ~ 261.
- 李素, 周瑶琪, 姚旭, 李超. 2012. 鲁东诸城地区恐龙足迹化石和原形恢复研究. 地质论评, 58(3): 434 ~ 443.
- 李守军. 1998. 山东侏罗—白垩纪地层划分与对比. 石油大学学报: 自然科学版, 22(1): 1 ~ 4.
- 李守军, 张祥玉, 赵秀丽, 孙智新, 张道元, 章磊, 徐磊, 魏宁, 刘宝梅. 2017. 山东省青岛市灵山岛下白垩统中发现鱼类和叶肢介化石. 地质论评, (1): 1 ~ 6.
- 刘明渭, 栾恒彦. 1994. 山东省侏罗—白垩纪岩石地层清理意见. 山东地质, 10(增刊): 53 ~ 69.
- 刘明渭, 张庆玉, 宋万千. 2003. 山东省白垩纪岩石地层序列与火山岩系地层划分. 地层学杂志, 27(3): 247 ~ 253.
- 刘小明. 2009. 由环境变化和生殖力响应规律揭示大型动物灭绝的必然性. 生物学通报, 44(10): 1 ~ 7.
- 柳永清, 旷红伟, 姬书安, 吕君昌, 刘燕学, 江小均, 彭楠, 陈铭培, 李家华. 2009. 晚中生代地球表层重大地质事件的陆地环境剧变与生物群演替响应. 地学前缘, 16(5): 37 ~ 47.
- 柳永清, 旷红伟, 彭楠, 姬书安, 王旭日, 陈树清, 张艳霞, 许欢. 2010. 鲁东诸城地区晚白垩世恐龙集群埋藏地沉积相与埋藏学初步研究. 地质论评, 56(4): 457 ~ 468.
- 柳永清, 旷红伟, 彭楠, 许欢, 刘燕学. 2011. 山东胶莱盆地白垩纪恐龙足迹与骨骼化石埋藏沉积相与古地理环境. 地学前缘, 18(4): 9 ~ 24.
- 陆克政, 戴俊生. 1994. 胶莱盆地的形成和演化. 山东东营: 石油大学出版社, 1 ~ 174.
- 吕洪波, 章雨旭, 肖加飞. 2004. 贵州贞丰中三叠统关岭组中 *chirotherium*——原始爬行类足迹研究. 地质学报, 78(4): 468 ~ 474.
- 吕洪波, 王俊, 张海春. 2011. 山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探. 地质学报, 85(6): 938 ~ 946.
- 彭冰霞. 2003. 甘肃永靖盐锅峡恐龙足迹及其古环境和古生态初步研究. 导师: 杜远生. 武汉: 中国地质大学/硕士学位论文: 1 ~ 47.
- 彭楠, 柳永清, 旷红伟, 吴清资, 刘海, 陈军, 许欢, 徐加林, 汪明伟, 王宝红, 王克柏, 陈树清, 张艳霞. 2013. 山东沂沭断裂带早白垩世晚期恐龙足迹特征差异性. 古地理学报, 15(4): 517 ~ 528.
- 山东省地质矿产局. 1991. 山东省区域地质志. 北京: 地质出版社, 191 ~ 223.
- 施炜, 张岳桥, 董树文, 武丽, 杜利林. 2003. 山东胶莱盆地构造变形及形成演化. 地质通报, 22(5): 325 ~ 334.
- 王宝红, 柳永清, 旷红伟, 王克柏, 陈树清, 张艳霞, 彭楠, 许欢, 陈军, 刘海, 徐加林, 汪明伟. 2013. 山东诸城棠棣戈庄早白垩世晚期恐龙足迹化石新发现及其意义. 古地理学报, 15(4): 454 ~ 466.
- 许欢, 柳永清, 旷红伟, 王克柏, 陈树清, 张艳霞, 彭楠, 陈军, 汪明伟, 王宝红. 2013. 山东诸城早白垩世中期超大规模恐龙足迹群及其古地理与古生态. 古地理学报, 15(4): 467 ~ 488.
- 张岳桥, 李金良, 张田, 董树文, 袁嘉音. 2008. 胶莱盆地及其邻区白垩纪—古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义. 地质学报, 82(9): 1229 ~ 1257.
- 钟建华. 2012. 灵山岛中生代沉积岩是深水源源浊积岩, 还是陆内三角洲沉积? ——与吕洪波教授商榷. 地质论评, 58(6): 1180 ~ 1182.
- An Wei, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Peng Nan, Xu Kemin, Xu Huan, Zhang Peng, Wang Kebai, Chen Shuqing, Zhang Yanxia. 2016. Detrital Zircon Dating and Tracing the Provenances of Dinosaur Bone Beds from the Late Cretaceous Wangshi Group in Zhucheng, Shandong. Geological Review, 62(2): 453 ~ 471.
- Alexander R M. 1976. Estimates of speeds of dinosaurs. Nature, 261(5556): 129 ~ 130.
- Dos Santos V F, Lockley M G, Meyer C A, Carvalho J, De Carvalho A G, Moratalla J J. 1994. A new sauropod tracksite from the Middle Jurassic of Portugal. Gaia, 10: 5 ~ 13.
- Dutuit J M, Ouazzou A. 1980. Découverte d'une piste de dinosaure sauropode sur le site d'empreintes de Demnat (Haut-Atlas Marocain). Mém. Soc. Géol. France, N. S., 139: 95 ~ 102.
- Fang Xiaosi, Pang qiqing. 1998. New Observations of Cretaceous Strata in the Yi-shu Region, Shandong. Geological Review, 44(3): 302 ~ 308.
- Farlow J O. 1992. Sauropod tracks and trackmakers integrating the ichnological and skeletal records. Zúbia, (10): 89 ~ 138.
- He Bizhu, Qiao Xiufu, Tian Hongshui, Zhang Yanxia. 2012. Paleoearthquake event and the migration of dinosaur on Laiyang Phase of Early Cretaceous, Zhucheng, Shandong Province, East of China. Acta Geologica Sinica, 86(8): 1320 ~ 1330.
- Kuang Hongwei, Xu Kemin, Liu Yongqing, Dong Chao, Peng Nan, Wang Kebai, Chen Shuqing, Zhang Yanxia. 2013. Geochemistry and Taphonomy of Late Cretaceous Dinosaur Bonebeds in Zhucheng, Eastern Shandong, China. Geological Review, 59(6): 1001 ~ 1023.
- Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Wu Qingzi, Cheng Guangsu, Xu Kemin, Liu Hai, Peng Nan, Xu Huan, Chen Jun, Wang Baohong, Xu Jialin, Wang Mingwei, Zhang Peng. 2013. Dinosaur track sites and palaeogeography of the late Early Cretaceous in Shuhe Rifting Zone of Shandong Province. Journal of Palaeogeography, 15(4): 435 ~ 453.
- Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Dong Chao, Peng Nan, Xu Huan, Wang Baohong, Zhang Peng, Wang Kebai, Chen Shuqing, Zhang Yanxia. 2014. Acta Geologica Sinica, 88(8): 1353 ~ 1371.
- Li Jianjun, Bate, Zhang Weihong, Hu Bailin, Gao Lihong. 2006. A New Type of Dinosaur Tracks from Lower Cretaceous of Chabu, Otog Qi, Inner Mongolia. Acta Palaeontologica Sinica, 45(2): 221 ~ 234.
- Li Qingping, Zhao Fengjiang. 1992. The establishment and time comparison of the Lower Cretaceous Wangshi Group in Shandong Province. Land and Resources in Shandong Province, 8(2): 13 ~ 21.

- Li Rihui, Zhang Guangwei. 2000. New Dinosaur Ichotaxon from the Early Cretaceous Laiyang Group in the Laiyang Basin, Shandong Province. *Geological Review*, 46(6): 605 ~ 610.
- Li Rihui, Zhang Guangwei. 2001. A Preliminary Study of Nonmarine Trace Fossils from The Laiyang Group (Early Cretaceous), Laiyang Badin, Eastern China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 40(2): 252 ~ 261.
- Li Rihui, Lockley M G, Matsukawa M, Wang Kebai, Liu Mingwei. 2011. An unusual theropod track assemblage from the Cretaceous of the Zhucheng area, Shandong Province, China. *Cretaceous Research*, 32(4): 422 ~ 432.
- Li Shoujun. 1998. Stratigraphical division and Correlation of Jurassic Cretaceous in Shangdong Province. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 22(1): 1 ~ 4.
- Li Shoujun, Zhang Xiangyu, Zhao Xiuli, Sun Zhixin, Zhang Daoyuan, Zhang Lei, Xu Lei, Wei Ning, Liu Baomei. 2017. Discovery of Fish and Conchostracan Fossils in Lower Cretaceous in Lingshan Island, Qingdao, Shandong. *Geological Review*, (1): 1 ~ 6.
- Li Su, Zhou Yaoqi, Yao Xu, Li Chao. 2012. Study on Dinosaur Track Fossils and Footprints Reconstruction in Zhucheng Area, Shandong Province. *Geological Review*, 58(3): 434 ~ 443.
- Liu Mingwei, Luan Hengyan. 1994. On The Division and Correlation of The Jurassic—Cretaceous Lithostratigraphic Units in Sandong Procince. *Land and Resources in Shangdong Province*. 10 (supplement): 53 ~ 69.
- Liu Mingwei, Zhang Qingyu, Song Wanqian. 2003. Division of the Cretaceous Lithostratigraphic and Volcanic sequences of Shandong. *Journal of Stratigraphy*, 27(3): 247 ~ 253.
- Lockley M G. 1986. The paleobiological and paleoenvironmental importance of dinosaur footprints. *Palaos*, 37 ~ 47.
- Lockley M G, Rice A. 1990. Did “Brontosaurus”; ever swim out to sea?: Evidence from brontosaur and other dinosaur footprints. *Ichnos: An International Journal of Plant & Animal*, 1(2): 81 ~ 90.
- Lockley M G. 1991. Tracking dinosaurs : a new look at an ancient world. Cambridge: Cambridge University Press: 1 ~ 238.
- Lockley M G, Santos V F. 1993. A preliminary report on sauropod trackways from the Avelino site, Sesimbra region, Upper Jurassic, Portugal. *Gaia*, 6: 38 ~ 42.
- Lockley M G, Hunt A P, Meyer C, Meyer C. 1994a. Vertebrate tracks and the ichnofacies concept; implications for paleoecology and palichnostratigraphy. In: Donovan S. ed. *The Paleobiology of tracefossils*. Chichester: Wiley, 10(1): 241 ~ 268.
- Lockley M G, Meyer C A, Hunt A P, Lucas S G. 1994b. The distribution of sauropod tracks and trackmakers. *Gaia*, 10: 233 ~ 248.
- Lockley M G, Farlow J O, Meyer C A. 1994c. Brontopodus and Parabrontopodus ichnogen. nov. and the significance of wide- and narrow-gauge sauropod trackways. *Gaia*, 10: 135 ~ 145.
- Lockley M G, Meyer C A, Santos V F. 1994d. Trackway evidence for a herdo f juvenile sauropods from the late Jurassic of Portugal. *Aspects of Sauropod Paleobiology*. *Gaia*, 10: 27 ~ 35.
- Lockley M G. 1999. The Eternal Trail: A tracker looks at evolution. Perseus Publishing: 1 ~ 334.
- Lockley M G, Wright J, White D, Matsukawa M, Li Jianjun, Feng Lu, Li Hong. 2002. The first sauropod trackways from China. *Cretaceous Research*, 23(3): 363 ~ 381.
- Lockley M G. 2009. New perspectives on morphological variation in tridactyl footprints: clues to widespread convergence in developmental dynamics. *Geological Quarterly*, 53(4): 415 ~ 432.
- Lockley M G. 2010. New perspectives on morphological variation in tridactyl footprints: clues to widespread convergence in developmental dynamics. *Geological Quarterly*, 53(4): 415 ~ 432.
- Lockley M G, Lucas S G, Matsukawa M, Harris J D. 2012. Cretaceous tetrapod footprint biostratigraphy, biochronology, and ichnofacies. *Journal of Stratigraphy*, 36(2): 503 ~ 550.
- Lockley M G, Li Rihui, Matsukawa M, Xing Lida, Li Jianjun, Liu Mingwei, Xu Xing. 2015. Tracking the yellow dragons: Implications of China's largest dinosaur tracksite (Cretaceous of the Zhucheng area, Shandong Province, China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 423: 62 ~ 79.
- Lu Kezheng, Dai Junsheng. 1994. The Formation and Evolution of Jiaolai basin. *Shangdong dongying: Petroleum University Publishing House*: 1 ~ 174.
- Lu Hongbo, Zhang Yuxu, Xiao Jiafei. 2004. Chirotherium: Fossil Footprints of Primitive Reptiles in the Middle Triassic Guanling Formation, Zhenfeng, Guizhou Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 78(4): 468 ~ 474.
- Lu Hongbo, Wang Jun, Zhang Chunhai. 2011. Late Mesozoic slump beds found in Lingshan Island and a pilot research on the regional tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 938 ~ 946.
- Liu Xiaoming. 2009. Environmental variation and fecundity response pattern reveal the inevitable extinction of large animals. *Bulletin of Biology*, 44(10): 1 ~ 7.
- Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Ji Shuan, Lu Junchang, Liu Yanxue, Jiang Xiaojun, Peng Nan, Chen Peiming, Li Jiahua. 2009. The biotic and environmental response to the geological events on the Earth during the Late Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(5): 37 ~ 47.
- Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Peng Nan, Ji Shuan, Wang Xuri, Chen Shuqing, Zhang Yanxia, Xu Huan. 2010. Sedimentary Facies and Taphonomy of Late Cretaceous Death of Dinosaur, Zhucheng, Eastern Shandong. *Geological Review*, 56(4): 457 ~ 468.
- Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Peng Nan, Xu Huan, Liu Yanxue. 2011. Sedimentary facies of dinosaur trackways and bonebeds in the Cretaceous Jiaolai Basin, eastern Shandong, China, and their paleogeographical implications. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 9 ~ 24.
- Matsukawa M, Futakami M, Lockley M G, Chen Peiji, Chen Jinhua, Cao Zhenyao, Bolotsky, U. L. 1995. Dinosaur footprints from the Lower Cretaceous of eastern Manchuria, northeastern China: implications for the recognition of an ornithopod ichnofacies in East Asia. *Palaos*, 10(1): 3 ~ 15.
- Olsen P E, Smith J B, McDonald N G. 1998. 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, USA). *Journal of Vertebrate Paleontology*, 18(3): 586 ~ 601.
- Peng Bingxia. 2003. Dinosaur footprints from Yanguoxia Yongjing County Gansu Province and implications for paleoenvironment and paleoecology. Advisor: Du Yuansheng. Wuhan: China University of Geosciences/Master degree papers: 1 ~ 47.
- Peng Nan, Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Wu Qingzi, Liu Hai, Chen Jun, Xu Huan, Xu Jialin, Wang Mingwei, Wang Baohong, Wang Kebai, Chen Shuqing, Zhang Yanxia. 2013. Differences in characteristics of dinosaur footprints in the late Early Cretaceous, Yishu Rifting Zone, Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 15(4): 517 ~ 528.
- Shandong Bureau of Geology and mMineral Resources. 1991. Regional Geology of Shandong Province. Beijing: Geological Publishing House: 191 ~ 223.

- Shi Wei, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Wu Li, Du Lilin. 2003. Tectonic deformation and formation and evolution of the Jiao-Lai basin, Shandong. *Geological Bulletin of China*, 22(5):325~334.
- Santos V F, Moratalla J J, Royo-Torres R. 2009. New sauropod trackways from the Middle Jurassic of Portugal. *Acta Palaeontologica Polonica*, 54(3):409~422.
- Vila B, Oms O, Galobart A, Bates K T, Egerton V M, Manning P L. 2013. Dynamic similarity in titanosaur sauropods: ichnological evidence from the Fumanya dinosaur tracksite (southern Pyrenees). *PLoS One*, 8(2):e57408.
- Wang Baohong, Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Wang Kebai, Chen Shuqing, Zhang Yanxia, Peng Nan, Xu Huan, Chen Jun, Liu Hai, Xu Jialin, Wang Mingwei. 2013. New discovery and its significance of dinosaur footprint fossils in the late Early Cretaceous at Tangdigezhuang Village of Zhucheng County, Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 15(4):454~466.
- Wilson J A, Carrano M T. 1999. Titanosaurs and the origin of “wide-gauge” trackways: a biomechanical and systematic perspective on sauropod locomotion. *Paleobiology*, 25(2):252~267.
- Xu Huan, Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Wang Kebai, Chen Shuqing, Zhang Yanxia, Peng Nan, Chen Jun, Wang Mingwei, Wang Baohong. 2013. Middle Early Cretaceous super-large scale dinosaur tracks in Zhucheng area, Shandong Province, and their palaeogeography and palaeoecology. *Journal of Palaeogeography*, 15(4):467~488.
- Xu Huan, Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Peng Nan. 2015. Reinterpretation of dinosaur footprints from the Lower Cretaceous of Huanglonggou, Zhucheng, Shandong Province, China: Comment on “Tracking the yellow dragons: Implications of China’s largest dinosaur tracksite (Cretaceous of the Zhucheng area, Shandong Province, China)” by Lockley et al. (2015). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.
- Xing Lida, Jerald H D, Wang Kebai, Li Rihui. 2010. An early cretaceous non-avian dinosaur and bird footprint assemblage from the laiyang group in the zhucheng basin, shandong province, china. *Geological Bulletin of China*, 29(8):1105~1112.
- Xing Lida, Marty D, Wang Kebai, Lockley M G, Chen Shuqing, Xu Xing, Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Zhang Jianping, Ran Hao, Persons W S. 2015. An unusual sauropod turning trackway from the Early Cretaceous of Shandong Province, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 437:74~84.
- Zhang Yueqiao, Li Jinliang, Zhang Tian, Dong Shuwen, Yuan Jiayin. 2008. Cretaceous to Paleocene tectono-sedimentary evolution of the Jiaolai basin and in the contiguous areas of Shandong peninsular (North China) and geodynamic implications. *Acta Geologica Sinica*, 82(9):1229~1257.
- Zhong Jianhua. 2012. Is the Mesozoic Sedimentary Rocks of Lingshan Island Deepwater turbidite or Continental delta deposit? *Geological Review*, 58(6):1180~1182.

The Sauropod Footprints Research in Zhucheng, Shandong

ZHANG Yanxia¹⁾, CHEN Jun²⁾, JIANG Xiaojun³⁾

1) *Dinosaur Research Center of Zhucheng, Zhucheng, Shandong, 262200;*

2) *Shandong Geological Sciences Institute, Jinan, 250013;*

3) *Department of Earth Sciences, Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650093*

Abstract: The sauropods are the biggest animals on land in the Mesozoic. They are widely distributed in Jurassic and Cretaceous and evolve very successfully. Sauropod footprint fossils were found from the Early Jurassic to the Late Cretaceous. There are many sauropod footprint fossils were found in three sites in the Early Cretaceous, Huang longgou located the south of Zhucheng, Zhangzhuhewan and Tangdigezhuang located the north of Zhucheng, What are the similarities and differences among three sites of the sauropod dinosaur footprints at Zhucheng area, and do these footprints of the track makers all belong to the same kind of sauropod dinosaurs? The area ratios of manus/pes prints foot based on a large number of data statistics indicated at least two different sauropods lived in Huanglonggou and Tangdigezhuang. Comparison of sauropods size in different times suggested the trend of evolution, which is the size become more and more smaller. The evolution is the result of changes in the environment.

Keywords: Zhucheng; sauropod; footprint fossils; Early Cretaceous; classification

Acknowledgements: This paper was supported by China Geology Survey (DD15-034) the National Natural Science Foundation of China (No. 41272021, 41372109, 90914003). We thank Professor Li Jianjun for his suggestions on this paper, and Xu Huan, Wang Baohong and Xing Lida for their contributions of helpful data.

First author: ZHANG Yanxia, female, born in 1982, mainly engaged in dinosaur fossils.

Correspondence author: JIANG Xiaojun, male, born in 1985, Mesozoic—Cenozoic geology; Email: cagsjiang@126.com

Manuscript received on: 2016-07-03; Accepted on: 2017-02-17; Edited by: LIU Zhiqiang.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.02.015