

北京延庆千家店地区土城子组恐龙足迹点沉积环境

何 情¹, 张建平², 邢立达², 路 硕³, 屈海英⁴

HE Qing¹, ZHANG Jianping², XING Lida², LU Shuo³, QU Haiying⁴

1. 安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

3. 安徽省地震局, 安徽 合肥 230031;

4. 攀西地质队, 四川 西昌 615000

1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China;

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

3. Anhui Earthquake Administration, Hefei 230031, Anhui, China;

4. Panxi Geological Party, Xichang 615000, Sichuan, China

摘要:北京延庆千家店地区晚侏罗世土城子组化石稀少,而新发现的恐龙足迹是北京恐龙存活过的重要证据,研究其沉积环境对恢复当时恐龙动物群的生活环境具有十分重要的意义。研究区恐龙足迹主要包括兽脚类、蜥脚类和可能的鸟脚类足迹。运用地层学、岩石学、古生物学和沉积学方法,通过地层剖面、岩石薄片、足迹分布、沉积构造及详细的粒度分布特征,综合得出千家店地区土城子组三段恐龙足迹点的沉积环境,认为当时的沉积环境为含火山碎屑的浅湖沉积,恐龙足迹的赋存层位为湖滨环境。

关键词:沉积环境;土城子组;恐龙足迹点;北京延庆

中图分类号:P534.52;Q915.2² **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2015)09-1726-09

He Q, Zhang J P, Xing L D, Lu S, Qu H Y. Sedimentary environment of Tuchengzi Formation dinosaur track site in Qianjiadian area, Yanqing County, Beijing. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(9):1726-1734

Abstract: Few fossils have been found in Late Jurassic Tuchengzi Formation from Qianjiadian District, Yanqing County, Beijing. Nevertheless, the new dinosaur footprints are important evidence of dinosaurs that once lived in Beijing. The study of its sedimentary environment is very important for reconstructing the living environment of dinosaur fauna. There are theropod, sauropod and possible ornithomimid tracks in the study area. Based on stratigraphic, petrological, paleontological and sedimentary research methods, the authors used the integrated characteristics of field section, dinosaur tracks distribution, sedimentary structure and grain size distribution to study the sedimentary environment of the third member of Tuchengzi Formation in Qianjiadian area. There was a volcanoclastic shallow lake here and the dinosaur tracks were formed in a lakeshore environment.

Key words: sedimentary environment; Tuchengzi Formation; dinosaur track site; Yanqing, Beijing

北京延庆晚侏罗世土城子组化石稀少,已报道的化石主要为延庆东北部花盆乡土城子组的昆虫化石组合,共存的还有介形虫、叶肢介、双壳类及植物化石^[1];其次是张武等^[2]于2000年首次报道的千家店镇下德龙湾村土城子组二段中的植物化石,并发

现木化石的一个新种——延庆苏格兰木(*Scotoxylon yanqingense*)。土城子组化石最新的研究成果是延庆千家店镇土城子组三段赋存的恐龙足迹(图1),张建平^[3]首次报道了这些足迹化石,并对不同化石点的足迹做了初步的描述与讨论。邢立达等^[4]在

收稿日期:2015-05-22;修订日期:2015-08-05

资助项目:安徽大学博士科研启动经费项目(编号:J01001319和J10113190092)

作者简介:何情(1987-),女,博士,讲师,从事遗迹化石研究及地质遗迹调查工作。E-mail: heqingzjb@163.com

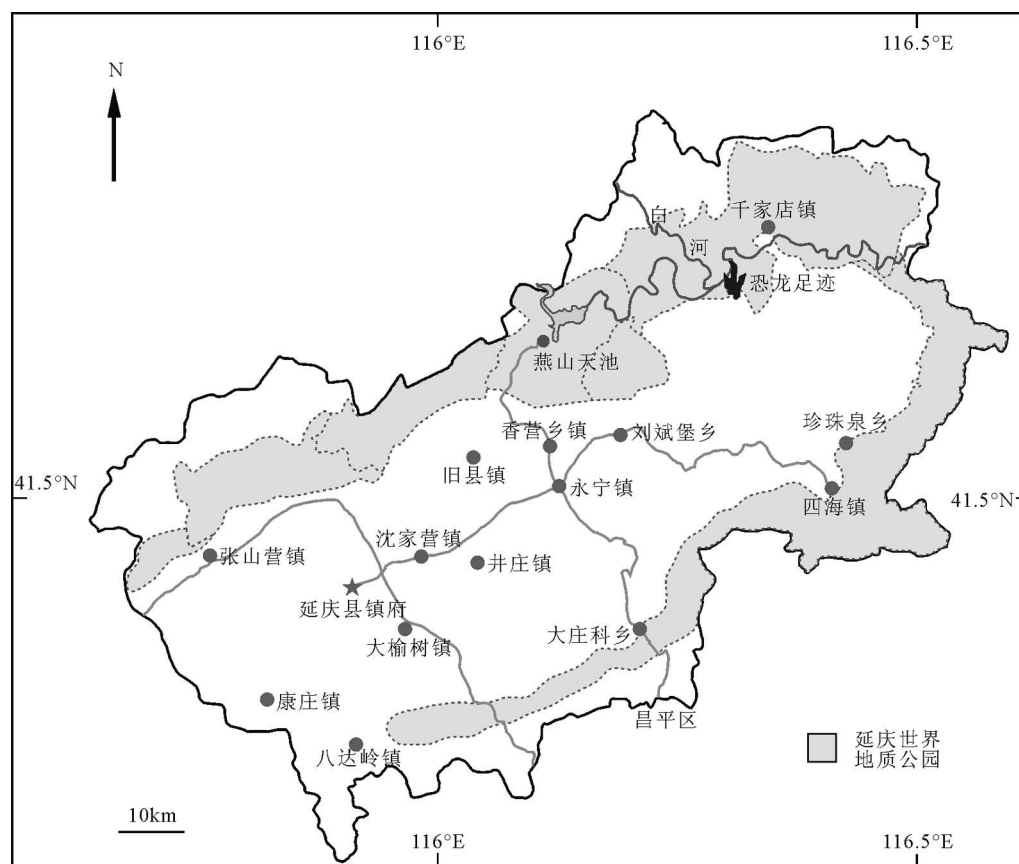


图1 延庆千家店恐龙足迹化石产地

Fig. 1 The location of dinosaur track site in Qianjiadian area, Yanqing County

此基础上这对这些恐龙足迹化石的形态特征进行了进一步的研究,并描述了更多的足迹点^[4],这对化石较少的土城子组无疑是重要的发现与突破。为了恢复当时恐龙动物群的生活环境面貌,本文在此基础上对恐龙足迹点的沉积环境进行了深入的研究与探讨。

1 地质背景

延庆地处华北地台中部燕山沉降带西端,中生代以来以燕山运动为主的构造变动奠定了延庆世界地质公园地质构造的基础格架和沉积盆地的雏形。公园内形成了3个火山构造盆地,包括东部的四海盆地、西部的白河堡盆地及中部的千家店盆地^[3-4]。其中千家店盆地土城子组为一套紫红色、灰绿色的河湖相沉积碎屑岩,以复成分砾岩和凝灰质砂岩为主。土城子沉积期,盆地内出现不同强度的火山活动。土城子组共包括4个岩性段^①:一段为砾

岩、粗砂岩及粉砂岩夹熔结角砾凝灰岩,属于河流-河口环境及河流-湖沼沉积环境,产木化石;二段为凝灰质细砂岩和粉砂岩,有泥岩及粉砂质泥岩夹层,沉积环境主要为辫状河沉积,包括河道、心滩、河间湖泊及溢岸4种沉积微相,产木化石^[5];三段以熔结角砾凝灰岩、凝灰质粉砂岩及粗安岩为主,夹凝灰质砂砾岩、砂岩及粉砂岩,属于河流-湖泊环境;四段为灰黑色复成分砾岩和含砾砂岩,代表高能河流环境^①。

延庆千家店恐龙足迹点位于土城子组三段,实测剖面位于土城子组三段内(图2),包含了所有的恐龙足迹点,累积岩层厚19.77m,整个剖面自下而上大致分为20层:下部1~5层,厚5.21m,对应取样标本编号为R001~R005;中部6~13层,厚7.59m,对应取样标本编号为R006~R013;上部14~20层,厚6.97m,对应取样标本编号为R014~R020。如图2所示,土城子组三段实测地层是一套沉积-火山岩系地层,沉积岩

地层系统					地层 编号	层厚 /m	岩性 符号	岩性描述	化石、沉积构造
界	系	统	组	段					
中生界	侏罗系	上侏罗统	土城子组	三段	20	1.4	▲ ▲ ▲	紫红色沉凝灰岩	
					19	0.34	▲ ▲ ▲	紫红色沉凝灰岩	蜥脚类、兽脚类、波痕和泥裂
					18	2.5	▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲	紫红色含凝灰质细中粒长石岩屑砂岩	蜥脚类、兽脚类、 鸟脚类恐龙足迹和潜穴
					17	0.54	▲	紫红色含凝灰质细粒长石岩屑砂岩	蜥脚类恐龙足迹
					16	0.44	▲	紫红色含凝灰质细粒岩屑长石砂岩	
					15	0.75	▲ ▲	紫红色含凝灰质细粒岩屑长石砂岩	
					14	1		紫红色含粉砂质微细粒长石岩屑砂岩	
					13	0.78	▲ ▲ ▲	紫红色沉凝灰岩	
					12	1.24	▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲	紫红色沉凝灰岩	
					11	1.50	▲ ▲ ▲	灰白色含凝灰质细中粒岩屑砂岩	
					10	0.98		紫红色中粗粒岩屑砂岩	
					9	0.67	. - .	紫红色含粉砂质细粒长石砂岩	潜穴
					8	0.35	. - .	紫色含粉砂质细粒长石砂岩	潜穴
					7	0.45		紫红色细粒长石砂岩	幻迹、潜穴、波痕和泥裂
					6	1.62	▲ ▲ ▲ ▲	灰绿色含凝灰质砾质岩屑砂岩	
					5	1.50		红褐色细粒含钙质长石砂岩	
					4	1.05	▲ ▲	紫红色含凝灰质细粒岩屑长石砂岩	
					3	0.89	▲ ▲	灰绿色含凝灰质中粗粒岩屑砂岩	
					2	0.70	▲	灰绿色含凝灰质细粒岩屑长石砂岩	
					1	1.07	▲ ▲	紫红色含凝灰质中细粒长石岩屑砂岩	

图2 延庆千家店土城子组三段实测地层综合柱状图
Fig. 2 Stratigraphic section of the third member of the Tuchengzi
Formation in Qianjiadian area, Yanqing County

中有多层沉凝灰岩夹层,凝灰质成分较多。这与土城子组上部热河群义县组的岩性一致,表明在晚侏罗世中国北方已经有部分的火山喷发^[6]。

2 岩石学特征

2.1 岩石类型

碎屑岩的结构可以反映当时的沉积环境特点。为了研究千家店地区土城子组的岩石结构,对土城子组三段所采集的20块沉积岩样品进行薄片

鉴定。综合野外观察和室内薄片鉴定结果,其岩性为长石岩屑砂岩、岩屑砂岩、沉凝灰岩、长石砂岩和岩屑长石砂岩(表1)。

2.2 岩石结构

2.2.1 陆源碎屑岩

陆源碎屑岩包括长石岩屑砂岩、岩屑砂岩、岩屑长石砂岩和长石砂岩(图版 I -A~D),均由陆源碎屑、填隙物或凝灰物组成,砂状结构,块状构造或纹层状构造。圆度中等,呈次棱角-次圆状,分选性

表1 延庆千家店地区土城子组三段实测剖面岩性组成
Table 1 Lithologic composition of the third member of the Tuchengzi Formation in Qianjiadian area, Yanqing County

剖面 名称	剖面 厚度/m	各种岩性厚度/m				
		长石岩屑砂岩	岩屑砂岩	沉凝灰岩	长石砂岩	岩屑长石砂岩
土城子组三段	19.77	5.11	4.99	3.76	2.97	2.94

一般,杂乱分布,陆源碎屑成分为石英、长石、岩屑。其中石英含量为5%~45%,长石含量5%~70%,岩屑含量3%~75%。

根据以上土城子组三段砂岩类型和结构可知,其砂岩类型多样,组分中出现了不稳定组分(长石、岩屑),且比例较高,其成分成熟度较低;而陆源碎屑呈次棱角-次圆状,杂乱分布,磨圆度和分选性一般,粘土(基质)含量较少,结构成熟度一般。土城子组三段岩石较低的成分成熟度及一般的结构成熟度均表明,当时的沉积环境不是很稳定,其碎屑物质搬运的距离较短,在离物源区较近的地方沉积下来,并未被外力充分改造,代表较弱的水动力条件。此外,有些地层中凝灰物的出现与当时的火山作用是密切相关的,越靠近顶部,凝灰物的含量越高。

2.2.2 火山碎屑岩

4块火山碎屑岩(R012、R013、R019、R020)均为沉凝灰岩(图版I-E、F),沉凝灰结构,块状构造,由正常沉积物和凝灰物组成。沉凝灰岩是一种常见的火山碎屑岩。土城子组三段中的沉凝灰岩在正常沉积岩中呈夹层出现,且凝灰物的含量大于正常沉积物。凝灰物的含量可以反映堆积位置离火山口的距离,含量越高,离火山口越近。从土城子组三段中部到上部的沉凝灰岩夹层看(标本号对应的是R012→R013→R019→R020),凝灰物的含量从55%上升到80%~85%,表明地层越往上,离火山口越近,即又有一次火山即将爆发。

3 恐龙足迹分布与沉积构造特征

目前,延庆千家店地区土城子组主要的恐龙足迹点包括6个,共保存有几百个足迹。其中兽脚类足迹最多,按足迹形态特征包括2种类型:A和B,A类包括小型、中型、大型3种类型的足迹^[4],小型足迹平均长约5.5cm,中型足迹平均长11~20cm,大型平

均长26~30cm,暂时归属于cf. *Eubrontes*;B类包括中型、大型足迹,中型足迹平均长12~20cm,大型足迹平均长约28.5cm,归属于*Grallator* isp.。其次是蜥脚类足迹,按后足迹大小可分为3种类型足迹:A、B和C,A类足迹平均长53.5cm,B类足迹平均长22.7~37.3cm,C类足迹平均长11.9cm,三者暂时归属于

cf. *Parabrontopodus* isp.^[4]。最后是可能的鸟脚类足迹,数量很少,且保存较差^[3]。其中的蜥脚类和鸟脚类足迹则是土城子组中的首次发现(图3-A)。

综合延庆千家店地区土城子组6个足迹点的所有恐龙足迹,蜥臀类足迹,即蜥脚类足迹和兽脚类足迹,占主导地位,鸟臀类足迹很少,只出现可能的鸟脚类足迹,且所有类型的足迹均出现在同一层位。在全球范围内,蜥脚类足迹总是伴随兽脚类足迹一起出现,如美国莫里森组的足迹组合以蜥臀类足迹为主导,很少与鸟脚类足迹大量保存在一起^[7]。

此外,在恐龙足迹层面上与其保存在一起的还有大量的泥裂和波痕。泥裂主要反映极浅水前滨岸环境周期性暴露的特征(图3-B);波痕为单向水流波痕,波脊形态复杂,从连续变得断续,显示水深很浅,代表有单向水流注入滨岸环境^[8](图3-C),此外,层面上还保存有无脊椎动物潜穴(图3-D),包括单杯迹未定种*Monocraterion* isp.^[9]和斯柯茵迹未定种*Scoyenia* isp.^[10],前者为近垂直岩层面的漏斗状遗迹,横切面为圆形,直径平均可达0.5cm,充填物为泥质沉积物,纵切面不清楚;后者在层面上表现为一些弯曲的痕迹,保存有不规则绳索状纹饰,直径为0.2~1.0cm,潜穴内部具有回填构造,充填物也为泥质沉积物,是陆相环境的典型代表^[11]。

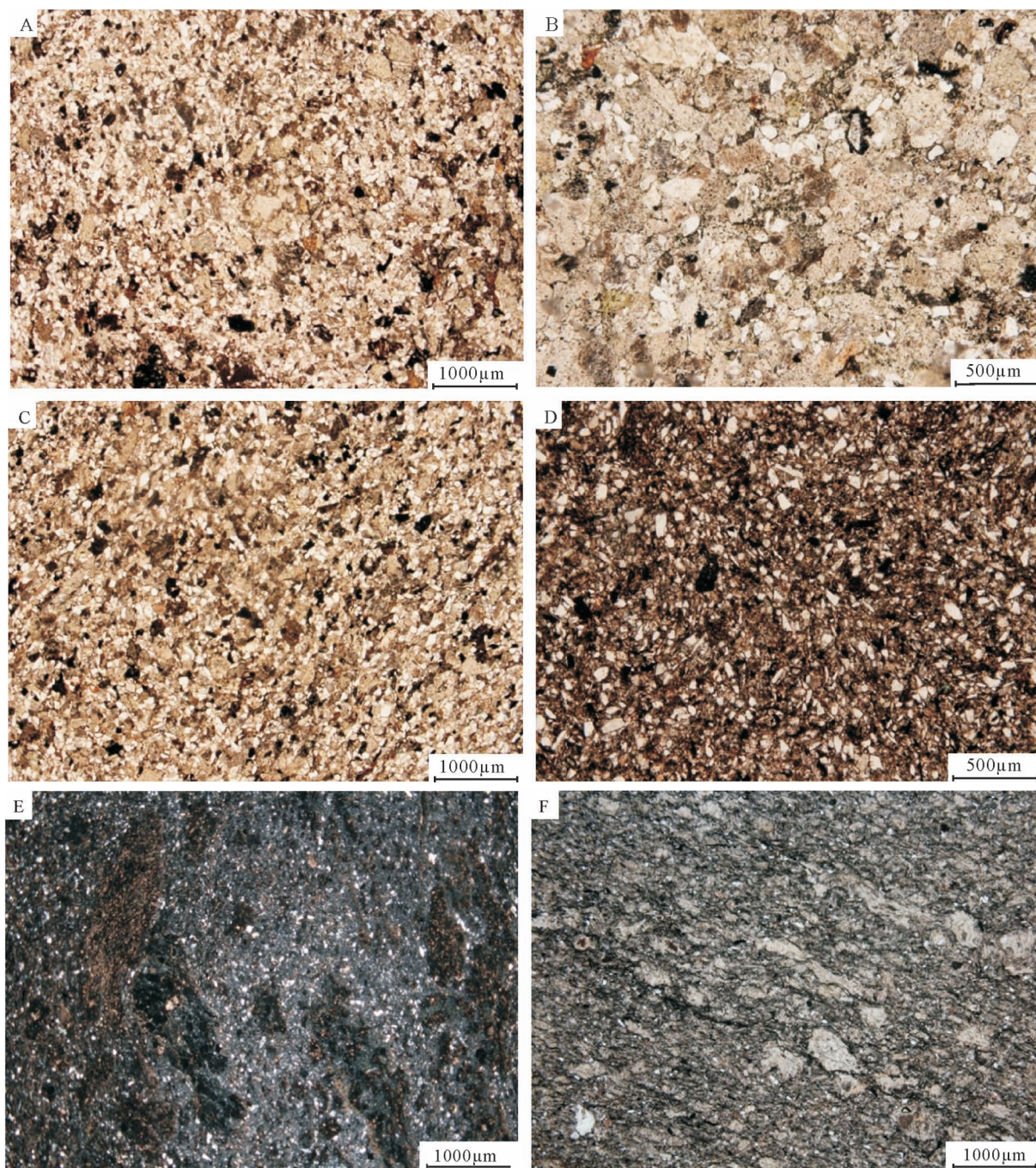
土城子组恐龙足迹与波痕、泥裂、潜穴一起保存在较大的砂岩或沉凝灰岩层面上,反映水深极浅的滨岸沉积环境,岩层均为紫红色,反映了当时干旱炎热的气候特点^[12]。

4 砂岩粒度分布特征

4.1 粒度参数特征及意义

为了进一步得出恐龙足迹的沉积环境,在野外工作的基础上做了室内粒度分析。目前最常用的粒度参数主要包括沉积颗粒的平均粒径、标准偏

图版 I Plate I



A.长石岩屑砂岩显微结构;B.岩屑砂岩显微结构;C.岩屑长石砂岩显微结构;
D.长石砂岩显微结构;E、F.沉凝灰岩显微结构

差、偏度及峰态,这4种参数均与沉积环境紧密相连。根据延庆千家店地区土城子组三段碎屑岩的原始粒度分析数据,计算得出所有砂岩样品的粒度参数(表2)。

据表2可知,土城子组三段碎屑岩平均粒径 M_z 位于 $0.94\sim 3.91\Phi$ 之间,主要集中在 $2.20\sim 3.67\Phi$ 之间,平均值为 2.81Φ ,为细砂岩-极细砂岩,较细的颗粒均表明一种能量较低的水动力条件;标准偏差

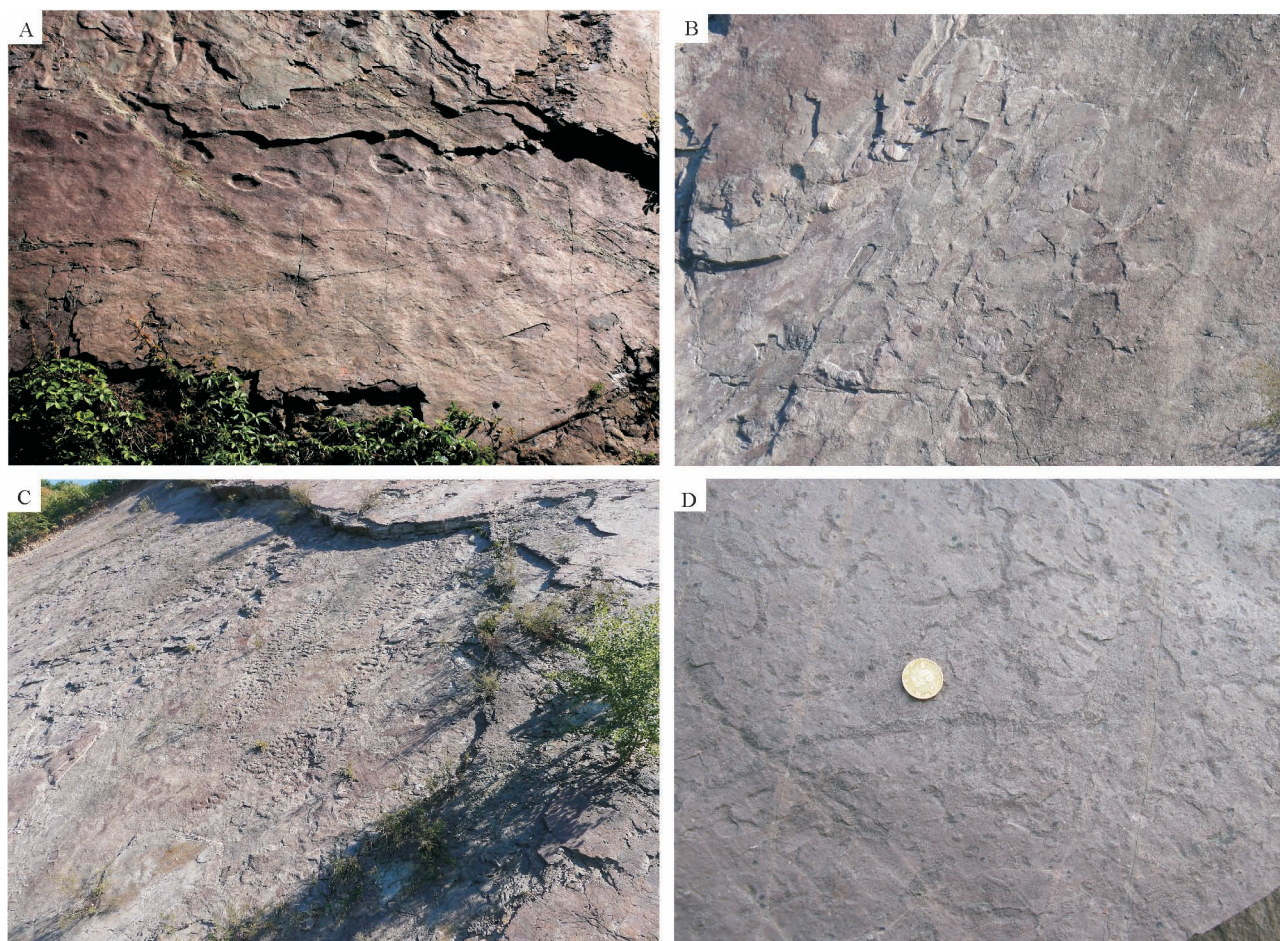


图3 沉积构造示意图

Fig. 3 Sedimentary structure

A—恐龙足迹;B—泥裂;C—波痕;D—潜穴

σ 位于0.47~1.52之间,平均值为0.8,根据Folk等^[13]的标准偏差分级标准,整体分选中等;偏度SK位于-0.35~0.33之间,平均值为0.01,根据Folk等^[13]的偏度等级划分标准,偏度曲线整体近对称,样品偏度值大多小于0,为负偏,说明以细颗粒为主,其他样品偏度值大于0,为正偏,也包含有粗颗粒;峰态 K_G 位于0.76~1.60之间,平均值为1.03,说明峰态中等,即沉积物进入新环境前的改造一般或新环境对它的改造一般,水动力条件相对弱一些,与薄片鉴定的结果一致。

根据Sahu^[14]的环境判别公式,可以区分不同的沉积环境。

(1) $Y(\text{湖滩和浅湖}) = 15.6634Mz + 65.7091\sigma^2 + 18.1071SK + 18.5043KG$ 。当 $Y < 65.3650$ 时,属于湖

滩环境;当 $Y > 65.3650$ 时,属于浅湖环境。

(2) $Y(\text{浅湖和河流}) = 0.2852Mz - 8.7604\sigma^2 - 4.8932SK + 0.0482KG$ 。当 $Y > -7.4190$ 时,属于浅湖环境;当 $Y < -7.4190$ 时,属于河流或三角洲环境。

公式(1)的平均Y值为110.27,而且所有样品的Y值均大于65.3650。根据Sahu^[14]得出的沉积环境判别值,当 $Y > 65.3650$ 时,属于浅湖沉积环境。

公式(2)的平均Y值为-5.42,其中只有3个样品的Y值小于-7.4190,其他样品的Y值均大于-7.4190。根据Sahu^[14]得出的沉积环境判别值,当 $Y > -7.4190$ 时,属于浅湖沉积环境。3个样品的值小于-7.4190,表明浅湖中有河流的注入,这与顶部出现的单向水流波痕保持一致。

因此,综合公式(1)和公式(2)得出,延庆土

表2 砂岩样品粒度参数统计

Table 2 Statistics of the grain characteristic parameters for the sandstones

样品编号	平均粒径 / M_z	标准偏差 / σ	偏度 / SK	峰态 / K_g	萨胡公式1 Y 值	萨胡公式2 Y 值
R001	2.48	1.00	-0.17	0.76	115.81	-7.18
R002	2.49	0.88	-0.04	0.86	105.50	-5.84
R003	0.94	1.27	0.26	1.25	148.60	-15.00
R004	2.89	0.71	-0.07	0.95	94.53	-3.16
R005	3.91	0.70	0.09	1.14	115.94	-3.53
R006	2.20	1.52	-0.35	0.87	196.43	-17.82
R007	3.62	0.47	0.12	0.96	91.00	-1.43
R008	3.53	0.89	-0.11	1.60	135.32	-5.34
R009	3.67	0.73	-0.04	0.98	109.56	-3.31
R010	1.26	0.68	0.02	1.05	69.63	-3.67
R011	1.69	0.92	0.30	1.19	110.04	-8.37
R014	3.54	0.70	-0.07	1.08	106.20	-2.84
R015	3.45	0.54	-0.09	1.00	90.00	-1.05
R016	3.75	0.47	0.00	0.94	90.28	-0.77
R017	3.68	0.61	-0.08	0.89	97.44	-1.80
R018	1.89	0.73	0.33	0.94	87.99	-5.66
均值	2.81	0.80	0.01	1.03	110.27	-5.42

城子组三段的沉积环境为浅湖环境,偶有河流的注入。

4.2 粒度参数散点图及意义

针对土城子组三段的所有样品的粒度参数,对其中的标准差和峰态、平均值和标准差2组数据

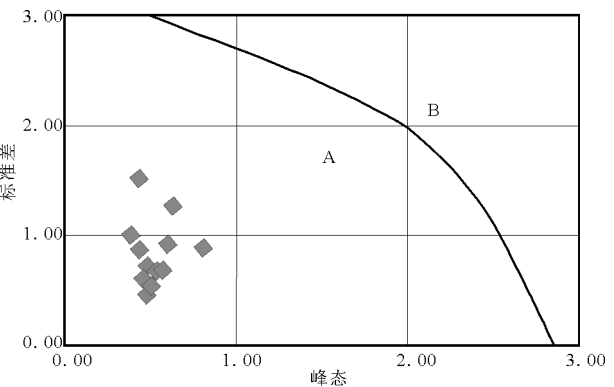


图4 土城子组三段砂岩样品的标准差对峰态散点图

Fig. 4 The scatter plots between standard deviation and kurtosis for the sandstones from the third member of the Tuchengzi Formation

A—湖(海)滩成因;B—沟谷与片流成因

在 Excel 表格里绘制散点图,然后同 Friedman^[15]标准的参数散点图进行对比。其中,标准差对峰态的散点图反映沉积相(图4),可以证明延庆土城子组三段的沉积环境为湖相沉积;平均值对标准差的散点图可以反映沉积物的来源(图5),表明土城子组三段沉积物的来源除了湖相沉积物以外,还有河流相沉积物,但以湖相沉积物为主。

5 古环境综合分析

恐龙足迹的保存具有十分严格的条件,足迹形成以后,需要足够的时间让足迹固结^[16]。在足迹形成的过程中,基底的硬度、粘度及含水量是影响足迹质量的重要条件^[17]。延庆千家店地区恐龙足迹的范围较大,说明当时该区存在广阔的滨岸环境。在恐龙足迹附近,保存有大量的波痕、泥裂及无脊椎动物潜穴,说明水深很浅,沉积物会周期性地暴露在水面上。详细的沉积岩薄片鉴定和粒度分析进一步证明,该地区保存有恐龙足迹的沉积环境为含火山碎屑的湖滨环境。

在千家店地区6个足迹点中,蜥脚类足迹数量较多,每个足迹点都有保存。根据前人研究,蜥脚类足迹和行迹一般保存在赤道到亚热带环境下的碳酸盐湖相或海相沉积,属于低纬度干旱或半干旱

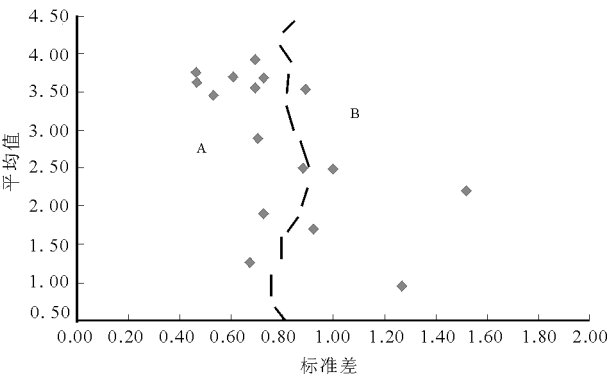


图5 土城子组三段砂岩样品的平均值对标准差的散点图

Fig. 5 The scatter plots between mean grain size and standard deviation for the sandstones from the third member of the Tuchengzi Formation

A—湖(海)相砂;B—河相砂

地区,其蒸发量大于降水量,很少出现在潮湿环境中,与鸟脚类恐龙足迹相反^[17-20]。

在中国,蜥脚类足迹同样是甘肃永靖县盐锅峡足迹点的重要组成部分,蜥脚类占整个足迹组合的38%^[21-22],代表典型的半干旱环境下的湖泊相沉积^[23]。此外,蜥脚类足迹还是内蒙古查布足迹点的重要组成部分,蜥脚类占整个足迹组合的36%,同样指示季节性干旱性湖泊环境^[24]。因此,蜥脚类足迹一般出现在半干旱-干旱气候条件下的河流或湖泊相内陆沉积盆地^[25]。以上证据表明,延庆地区在晚侏罗世处于半干旱-干旱的气候条件。这一结论与冀北-辽西晚侏罗世土城子沉积时期的气温带类型(亚热带)及干湿度类型(半干旱-干旱环境)一致,即半干旱-干旱的亚热带气候环境^[26]。

在欧洲,蜥脚类足迹大量保存在上侏罗统碳酸盐台地中,在下白垩统中急剧减少,而鸟脚类足迹数量逐渐增加,除了两者之间的竞争关系外,主要是因为气候越来越潮湿^[25]。延庆千家店地区的土城子组三段位于侏罗系、白垩系之交,足迹层位处于上侏罗统,保存的蜥脚类足迹数量远大于鸟脚类足迹数量,符合古气候的变化特征。延庆地区越来越干旱的古气候特征也与当时越来越强的火山作用密不可分。这些火山碎屑湖泊的存在便成了这种干旱气候条件下周围恐龙生活的主要水源,而不是恐龙的栖息地^[27]。这种现象也出现在上白垩统的甘肃盐锅峡组、内蒙涇川组及韩国京东组的恐龙足迹点^[23-24, 28]。

6 结 论

延庆千家店地区土城子组恐龙足迹是北京地区恐龙存活过的重要证据。岩石薄片鉴定结果显示,含足迹地层的主要岩性为陆源碎屑砂岩和沉凝灰岩;兽脚类、蜥脚类、鸟脚类恐龙足迹与波痕、泥裂、潜穴(*Monocraterion* isp.和*Scoyeniai* isp.)保存在一起,指示水深极浅;根据粒度分析的沉积环境判别公式,结合粒度参数特征、结构参数散点图,综合研究表明,延庆土城子组恐龙足迹点沉积环境为含火山碎屑的湖相沉积,恐龙足迹赋存在水深更浅的滨岸环境。大量蜥脚类足迹的存在表明,当时的气候比较干旱,与火山作用密不可分。

致谢:野外资料收集期间得到中国地质大学

(北京)博士生茅磊,硕士生谢静、李志华,以及北京市延庆县世界地质公园管理处尤宝军、谢蕾蕾、王佳、罗坤、吴剑锋、王凤斌等的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]洪友崇,萧宗正.北京延庆后城组蜚镰目、鞘翅目、长翅目化石(昆虫纲)[J]. 北京地质,1997,3:1-10.
- [2]张武,郑少林,丁秋红. 苏格兰木(*Scotoxylon*)在中国首次发现[J]. 植物学通报,2000,17:202-205.
- [3]张建平,邢立达,Gierliński G D,等. 中国北京恐龙足迹的首次记录[J]. 科学通报,2012,59(2):144-152.
- [4]Xing L D, Zhang J P, Lockley M G, et al. Hints of the early Jehol Biota: important dinosaur footprint assemblages from the Jurassic-Cretaceous Boundary Tuchengzi Formation in Beijing, China[J]. Plos one, 2015, 10(4): 1-34.
- [5]郭佳,邓宏文,季春辉,等. 北京北部上侏罗统辫状河体系沉积特征[J]. 现代地质,2011,25 (4):642-649.
- [6]季强,陈文,王五力,等. 中国辽西中生代热河生物群[M]. 北京:地质出版社,2003: 1-375.
- [7]Lockley M G, Foster J, Hunt A P. A short summary of dinosaur tracks and other fossil footprints from the Morrison Formation[J]. Modern Geology, 1998, 23: 277-290.
- [8]郑伟,齐永安,刘顺喜,等. 河南云台山世界地质公园云梦山组波痕类型及其成因分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2008, 27(4): 400-403.
- [9]Torell O M. Petrificata Suecana Formations Cambraicae[J]. Lunds Univ Arsskr, 1870, 2(8):1-14.
- [10]White C D. Flora of the Hermit shale, Grand Canyon, Arizona[M]. Carnegie Inst. Washington Publ., 1929, 405:1-221.
- [11]杨式溥,张建平,杨美芳. 中国遗迹化石[M]. 北京:科学出版社,2004:1-353.
- [12]郑元,吕洪波,章雨旭,等. 山西黎城中元古代砂岩层面多种痕迹特征及成因初析[J]. 地质论评,2009,55(1): 1-9.
- [13]Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: A study in the signification of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27: 3-27.
- [14]Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1964, 34: 73-83.
- [15]Friedman G M. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1967, 37: 327-354.
- [16]Thulborn T. Dinosaur tracks[M]. Chapman and Hall, 1990: 1-410.
- [17]甄朔南,李建军,韩兆宽,等. 中国恐龙足迹研究[M]. 成都:四川科技出版社,1996: 1-110.
- [18]Lockley M G, Farlow J O, Meyer C A. *Brontopodus* and *Parabron-*

- topodus* ichnogen.nov. and the significance of wide- and narrow-gauge sauropod trackways[J]. Gaia, 1994, 10: 135-145.
- [19] Dong Z M. Early Cretaceous dinosaur faunas in China: an introduction[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1994, 30: 2096-2100.
- [20] Houck K J, Lockley M G. Life in an active volcanic arc: Petrology and sedimentology of dinosaur track beds in the Jindong Formation (Cretaceous), Gyeongsang Basin, South Korea[J]. Cretaceous Research, 2006, 27: 102-122.
- [21] Li D Q, Azuma Y, Fujita M, et al. A preliminary report on two new vertebrate track sites including dinosaurs from the Early Cretaceous Hekou Group, Gansu Province, China[J]. Journal of Paleontological Society of Korea, 2006, 22: 29-49.
- [22] Zhang J P, Li D Q, Li M L, et al. Diverse dinosaur-, pterosaur-, and bird-track assemblages from the Hekou Formation, Lower Cretaceous of Gansu Province, northwest China[J]. Cretaceous Research, 2006, 27: 44-55.
- [23] 彭冰霞. 甘肃永靖盐锅峡恐龙足迹及其古环境和古生态初步研究[D]. 武汉: 中国地质大学硕士学位论文, 2003.
- [24] 李建军, 白志强, 魏青云. 内蒙古鄂托克旗下白垩统恐龙足迹[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1-109.
- [25] Lockley M G, Wright D, White D, et al. The first sauropod trackways from China[J]. Cretaceous Research, 2002, 23(3): 363-381.
- [26] 许坤, 杨建国, 陶明华, 等. 中国北方侏罗系(Ⅶ)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-261.
- [27] Paik I S, Kim H J, Lee Y I. Dinosaur track-bearing deposits in the Cretaceous Jindong Formation, Korea: occurrence, palaeoenvironments and preservation[J]. Cretaceous Research, 2001, 22: 79-92.
- [28] Lockley M G, Houck K, Yang S Y, et al. Dinosaur-dominated footprint assemblages from the Cretaceous Jindong Formation, Hal-lyo Haesang national park area, Goseong County, South Korea: evidence and implications[J]. Cretaceous Research, 2006, 27: 70-101.
- ①北京市地质矿产局. 中华人民共和国区域地质调查说明书永宁镇幅和四海幅(1:50000)(内部出版物). 1993.