

doi: 10.12029/gc20180510

黄乐清, 唐鹰, 童潜明, 黄建中, 李光, 胡能勇. 2018. 株洲天元白垩纪含化石层地质记录及恐龙死亡、埋藏过程初探[J]. 中国地质, 45(5): 1023–1038.

Huang Leqing, Tang Ying, Tong Qianming, Huang Jianzhong, Li Guang, Hu Nengyong. 2018. Geological records of fossils layer and death process and taphonomy of dinosaurs in Cretaceous in Tianyuan, Zhuzhou[J]. Geology in China, 45(5): 1023–1038(in Chinese with English abstract).

株洲天元白垩纪含化石层地质记录及恐龙死亡、埋藏过程初探

黄乐清¹ 唐鹰² 童潜明³ 黄建中¹ 李光² 胡能勇²

(1.湖南省地质调查院,湖南长沙 410116;2.湖南省地质博物馆,湖南长沙 410004;3.湖南省地质研究所,湖南长沙 410007)

摘要: 株洲天元恐龙化石遗迹区,是湖南省新发现的一个恐龙化石产地,亦是当今世界上为数不多的位于大中城市中心的恐龙化石埋藏地之一。本文在区域资料的基础上,首次在上白垩统含化石层段中识别出暴露地质记录、洪水记录及震积记录等 3 个特殊的地质体;同时,通过大量砾石的科学统计,明确了株洲天元湖盆的古流向为自南往北,进而指出恐龙生活在呈 NE-SW 向展布的株洲湖盆南岸。在上述研究基础上,本文推测:在气候干旱少雨、植被稀少的古环境中,火山(?)、地震、滑坡、洪积等一系列局部性突发的地质事件直接导致了株洲天元地区生态环境的恶化,这亦成为该区恐龙死亡的主导因素。其骨骼埋藏与河道冲积入湖形成三角洲沉积体系这一过程密切相关。

关键词: 株洲天元;晚白垩世;恐龙化石;地质记录;埋藏相

中图分类号: Q915.2³ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2018)05-1023-17

Geological records of fossils layer and death process and taphonomy of dinosaurs in Cretaceous in Tianyuan, Zhuzhou

HUANG Leqing¹, TANG Ying², TONG Qianming³, HUANG Jianzhong¹,
LI Guang², HU Nengyong²

(1. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, Hunan, China; 2. Hunan Museum of Geology, Changsha 410004, Hunan, China; 3. Hunan Academy of Geological Sciences, Changsha 410007, Hunan, China)

Abstracts: Based on the study of regional geological data, the authors recognized 3 sedimentary events in the Upper Cretaceous formation for the first time, with the 3 geological records being exposure geological record, flood geological record and earthquake geological record. In addition, on the basis of lots of scientific statistics of gravels, the authors discussed the paleocurrent direction as well as provenance of the lake basins in Tianyuan of Zhuzhou systematically. The authors found that dinosaurs lived on the west bank of a long narrow NE-SW distributed lake in the south part of the Zhuzhou lake basin. Based on the results obtained, the authors infer that local volcano (?), earthquake, landslide and pluvial events are the reasons for paleoclimatic change and animals'

收稿日期:2016-06-25;改回日期:2018-06-20

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2017JJ3139)、国家自然科学基金项目(41502011)与株洲天元恐龙化石调查项目(JYDY-ZZ1504078)联合资助。

作者简介:黄乐清,男,1985年生,工程师,主要从事区域地质调查工作;E-mail:289773254@qq.com。

death as well as the main reasons for the death of dinosaurs in the palaeoenvironment with dry weather and scarce forest vegetation. The burial process was closely related to the delta deposit system from channel alluvial.

Key words: Zhuzhou; Tianyuan; Late Cretaceous; dinosaur; geological record; taphonomy

About the first author: HUANG Leqing, male, born in 1985, engages in regional geological survey; E-mail:289773254@qq.com.

Fund support: Supported by Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2017JJ139), National Natural Science Foundation of China (No. 41502011) and Dinosaur fossils Investigation project in Tianyuan Zhuzhou City (No. JYDY-ZZ1504078).

1 引 言

恐龙的研究,尤其是涉及到与恐龙生活、死亡相关的生态环境演变问题一直是地学界、古生物学的学术热点问题。国外以 Brinkman(1990)、Godefroit and Motchurova(2010)、Grigorescu(2010)、Horner(2011)、Egerton(2013)等为代表的研究学者们对骨骼化石埋藏地层层序与年代、埋藏骨骼化石特征(种群、骨骼改造特征与完整性、富集程度、保存数量和质量、骨骼的排列方式与行为方式、骨骼内部结构与地球化学特征等)、骨骼化石埋藏类型及其埋藏成因等进行了深入研究,这些成果在恢复同期古生态环境、古地理及古气候等方面具有一定的理论意义。近年来,国内以殷秀兰(2005)、旷红伟(2014)、何碧竹(2011;2012)、柳永清(2010;2011)等一大批地质学家为代表,对可能导致晚白垩世时期恐龙灭绝或死亡的地质事件展开了专门性的研究,主要从古地震事件、洪水事件、火山事件、天体撞击事件等事件沉积的角度出发,以灾变论的思想为主线,将地质学、古生物学、古生态学、事件沉积学等多个学科领域相互交叉、联系,为恐龙灭绝的深层次的原因提供了解疑思路。

湖南地区的白垩系红层中发现有零散的恐龙牙齿以及一定丰度的恐龙蛋化石,已有少量报道(赵别全,1982;关绍曾,1989)。然而,由于省内缺少恐龙化石的集群发现,这使得在恐龙化石遗迹及其古环境研究方面,湖南省长期处于低水平状态。2008年,湖南省株洲市天元区在施工过程中首次发现了恐龙化石,也引起了国内恐龙专家赵进喜、张发奎、徐星、王海军等的注意并到现场确认,但截至目前,其研究成果相对较少。仅童潜明、刘钟伟、王根贤等教授^①针对恐龙化石埋藏地的岩石类型、沉积相及其化石初步分类等方面展开了初步调查和研究,提供了不可或缺的第一手资料。随后,湖南省地质博

物馆联合湖南省地质调查院选派技术人员对含化石层的地层归属进行了重新厘定^②。另外,国内个别学者如韩凤禄等(2017)对这些恐龙化石进行了初步的形态学研究,指出株洲化石点可能包括至少两种蜥脚类、三种兽脚类和一种鸭嘴龙类。总体来说,这些年来,尽管通过各位专家学者的不断努力,在株洲恐龙化石点的化石分类、化石赋存地层和埋藏环境等方面取得了一些研究进展,但是许多科学问题还有待深入研究,尤其在恐龙化石的死亡原因、来源、搬运方向、堆积等关键问题上存在盲区,严重阻碍了化石的发掘,亦成为建设株洲市恐龙博物馆这一文化工程中最现实的拦路虎。

后期,笔者有幸参与并承担了化石点沉积相与埋藏特征的调查和研究工作。经过精细的调查发现,该套地层中可见古风化面、洪漫层、含凝灰质泥岩夹层(?)以及迅速尖灭的块状砾岩层等标志性沉积体,预示着区内经历过局部性的暴露事件、洪水事件、震积事件及火山事件。这一系列的事件与恐龙生存环境的恶化息息相关。本文在区域地层等相关研究基础上(湖南省岩石地层,1997;童光辉等,2015),对株洲天元地区化石埋藏地的岩石学特征、沉积环境、标志事件以及化石埋藏学特征等进行重点研究,阐述了晚白垩世生活在株洲盆地一带恐龙死亡的原因及死亡后的埋藏过程。

2 区域地质背景

中生代裂陷作用的背景下,在湖南省内形成了一系列北东—北北东向断陷盆地,这些盆地与宽窄不等的断隆相间排列,形成醒目的盆岭地貌。盆地普遍充填巨厚的红色岩系,俗称“红盆”。湖南中生代“红盆”是中国东部中生代盆地的一部分,在形成机理及大地构造属性上是一致的,大地构造属性上具有大陆裂谷性质(湖南省区域地质志,1988;柏道远等,2015)。

本文研究的株洲红盆属于湘东地区一系列白垩纪—古近纪沉积盆地(“茶永红盆”、“醴攸红盆”、“株洲红盆”、“湘潭红盆”)中的一个,在白垩纪晚期,湖南洞庭盆地、衡阳盆地和湘东的北东向斜列的茶永(茶陵—永顺)、醴攸(醴陵—攸县)、株洲等盆地是连在一起的,往北与南阳盆地、江汉盆地可能相通。故该时期在中国中南地区的秦岭以南,大别山脉和幕阜罗霄山脉以西,武陵山和雪峰山脉以南,南岭山地以北有一个辽阔的内陆大湖(图1),由于株洲天元晚白垩世恐龙化石的出土及其重要意义,童潜明等将其命名为“古洞庭湖”^①,盆内主要充填一套具明显韵律性和旋回结构的岩屑(杂)砂岩—长石(杂)砂岩组合。化石埋藏区所属地层为上白垩统戴家坪组中、下段,地层出露厚度约50 m,岩性主要为一套洪积相—河流相块状砾岩、向上变为滨浅湖相砂岩、粉砂岩、泥岩(图2),区域上产介形类 *Talicypridea-Cypridea-Candona* 组合,时代属晚白垩世早期(湖南省岩石地层,1997)。

3 特殊地质记录

研究区保留有厚约50 m的地层剖面(图3a、d、

g),露头较好,现象丰富。通过实地调查和研究发现,区内共经历有暴露、洪水、火山及震积等4个局部性的地质突发事件。因此,本文引入“集群死亡”和“沉积事件”概念(秦锡虎,1999),对株洲天元“恐龙化石遗迹区”的死亡和埋藏机制进行探讨。

3.1 暴露地质记录

在陆相碎屑地层中,暴露地质记录有一系列的识别标志,如干裂、古剥蚀面、石膏聚集层、灰质土、古风化壳等。在垂向地层剖面底部(图2),泥岩—粉砂质泥岩韵律叠置的序列之上(0层),有粒度逐渐变粗的趋势,至顶部可见风化壳层(1层),该层与上覆洪积含砾泥岩层呈不协调接触,这种不协调接触一般代表不整合面的存在(陈洪德等,1994)。不整合面之下为褐黑色黏土质风化残坡积砾岩层,该砾岩层在野外剖面露头上较为松散,风化壳表面凸凹不平,风化后多呈褐黑—紫红色,部分为土黄色。古风化壳厚度一般为几十厘米至1 m不等,风化层中砾石成分以土黄色板岩为主、灰绿色粉砂岩次之,另有石英岩、硅质岩少量,分别约占9%、4%。未见灰岩砾石(图3a,表1)。风化残积砾岩层之下为戴家坪组基岩,该基岩与风化壳层呈渐变过渡关系,

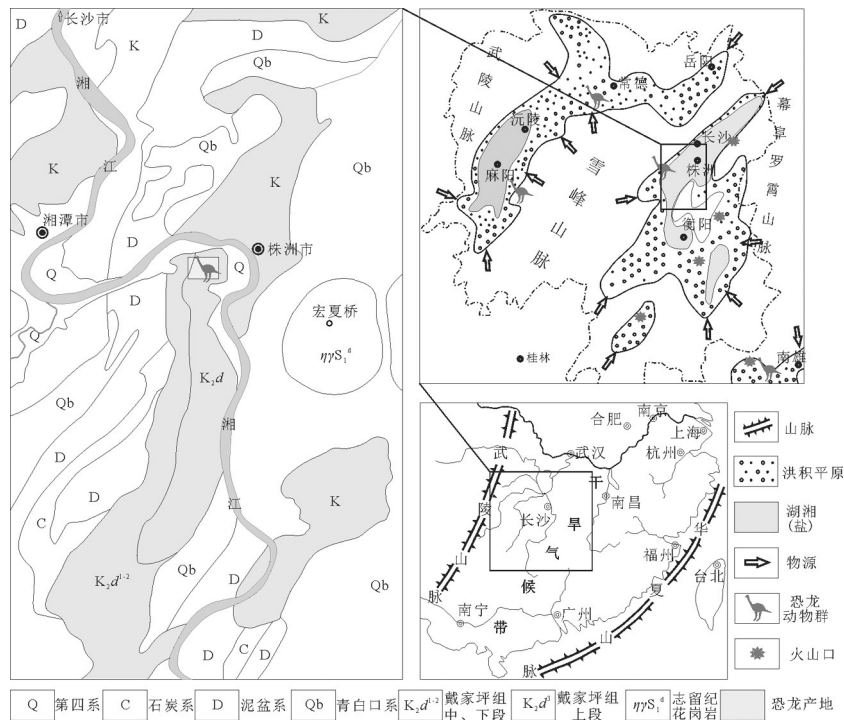


图1 研究区位置及区域地质特征(示株洲天元恐龙化石产地)
Fig.1 Location and regional geological characteristics of the research area (showing dinosaur fossils in Tianyuan, Zhuzhou City)

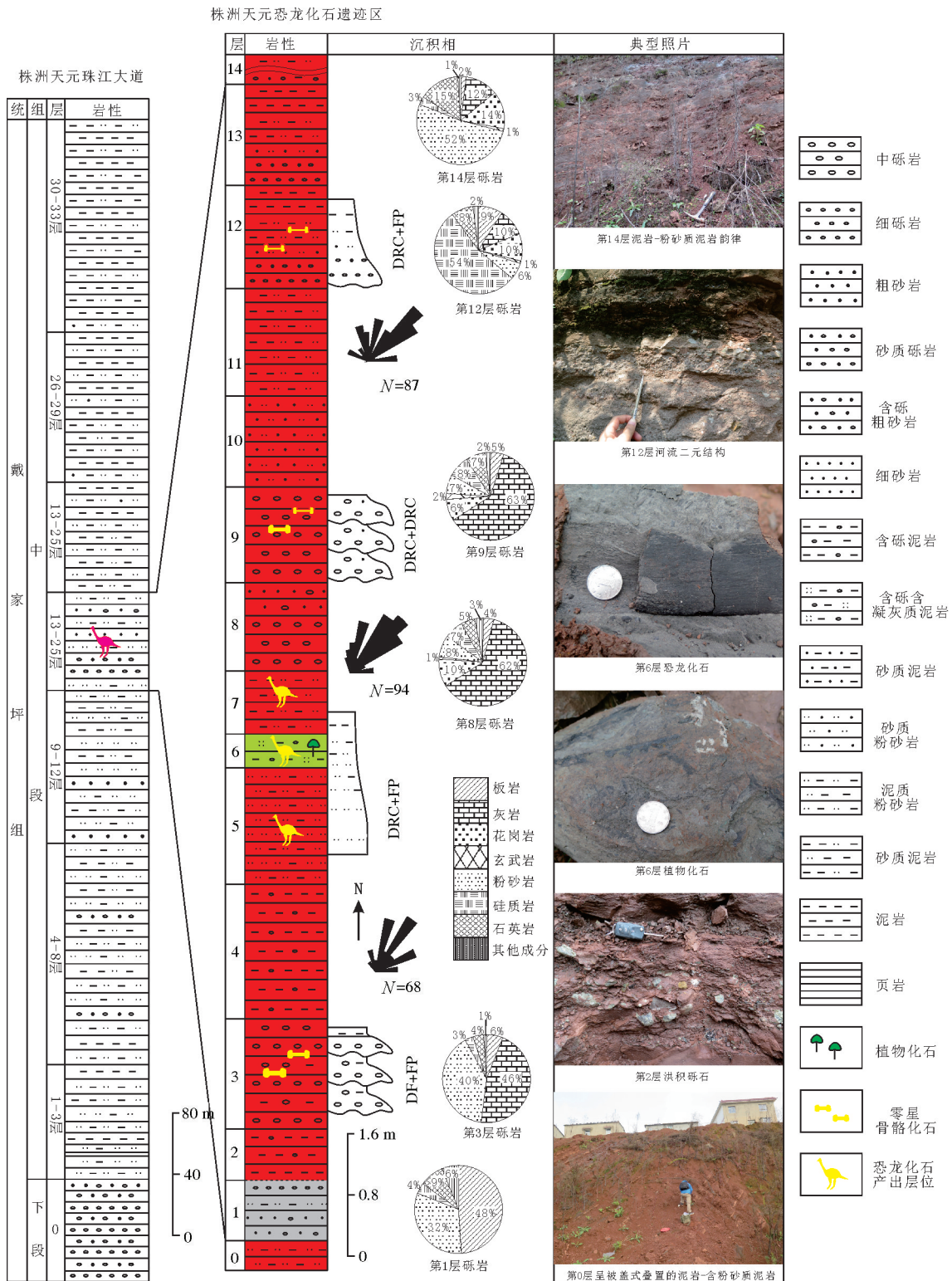


图2 株洲天元地区白垩纪地层、沉积岩相序列和恐龙化石层位
(微相类型:DF—泥石流;FP—洪积平原;DRC—辫状河道)
Fig.2 Cretaceous stratigraphic columns and dinosaur fossil horizons in Tianyuan, Zhuzhou City
(DF—Debris flow; FP—Flood plain; DRC—Braided river)



图3 株洲天元恐龙化石埋藏区的典型沉积特征

a—1至4层沉积序列;b—第1层古风化砾岩层特征(见上覆洪积泥岩层浸染);c—穿插式、长柱状钙质粉砂岩结核(第4层);d—5至6层沉积序列;e—灰绿色含凝灰质砂泥岩特征,含植物化石(第6层,为图d的放大);f—由沙纹层理向水平层理过渡的特征(第2层);g—7至12层沉积序列;h—负载构造,其中见砾岩透镜体a长轴顺滑脱方向、周缘有泥岩脉b插入(图g中第8层局部的放大);i—卷曲变形构造,呈“Z”或“反S”形,岩性为细—中粒砂岩;j—枕—球状构造,a与b隔离,但基本能镶嵌、吻合(第3层);k—波状变形构造,一系列彼此相邻无序褶皱构成,下部强烈变形,往上减弱;l—震积角砾岩,整体可拼贴(第5层);m—液化砂岩脉,向上液化、侵位的特征;n—河道二元结构特征,层底部砾石具明显的叠瓦状构造,ab面倾向SSW(第12层);o—滨浅湖相粉砂质泥岩中的虫迹构造,见垂直钻孔及水平爬迹

Fig.3 Sedimentary characteristics of dinosaur fossil horizons, Tianyuan, Zhuzhou City

a—1 th-4 th layer sedimentary sequence; b—Characters for the first ancient wholly-weathered conglomerate layer; c— Alternative long columnar calcareous siltstone nodules (the fourth layer); d— Characters for celadon tuffaceous sandy mudstone, including plant fossils (the 6th layer, the larger version of diagram d); f— Characters for sand ripple bedding to horizontal bedding (the 2nd layer); g—7th-12th layer sedimentary sequence; h— Load structure; i— Convolute deformation structure; j— Orbicular structure; k— Wavy deformation structure; l— Shock deposited breccias; m— Liquefied sandstone dike; n— River binary structure; o— Vermiculation structure in coastal shallow-lake facies silty mudstone

两者差异较为明显,主要体现在颜色、岩性、结构、致密程度等方面,易于识别。

3.2 洪水地质记录

研究区洪积层(第2层)上覆于风化残积层之上,以细粒为主,具有洪水效应的古平流沉积标志,主要体现在以下几个方面:

在沉积物的颜色方面,由于平流沉积物为低频特大洪水在河流两岸达到最高水位且流速近乎为零的状态下逐渐沉积下来的(Baker,1987),因而在洪水事件中的古平流沉积层与上、下接触地层在颜色方面往往有明显的区别。通过剖面测制,笔者发现洪水沉积物呈鲜艳的紫红色,粒度细、以泥质为主,偶见漂浮状砾石;下伏残积层呈褐黑色、土黄色等杂色调;洪水层的上覆岩块质砾岩层具旱地泥石流相的特点(图3a、b),表现为灰绿色、灰紫色泥砂质中、细砾岩,磨圆差,分选较差,砾石大小不一,并遭受严重风化。

在沉积物的粒度及沉积构造方面,由于平流沉积是在特殊的、接近静水的水动力环境下形成的,因而其粒度较细,沉积物中以悬移质沉积为主,砂质成分相对较少。野外露头上,该层呈现沙纹层理向水平纹层状过渡的特点(图3f),这些都是受平流沉积物形成时的特殊水动力条件所决定,是比较典型的洪水事件沉积。

3.3 火山地质记录

晚白垩世,中国东部受到太平洋板块俯冲作用

的影响,先期的原型盆地及同期小型断拗型盆地受到持续的改造而最终成为残余型盆地(王能盛等,2015)。在国内恐龙化石遗迹区,如诸城、莱阳一带的胶莱盆地内(柳永清等,2011;旷红伟等,2014)、浙江天台盆地(姜杨等,2011;俞方明等,2012)及山西天镇大同盆地(康铁笙等,1996)等盆地周缘或内部均发现了火山或构造热事件的产物。

晚白垩世,受北东及北东东向两组壳型深大断裂的控制,湖南裂谷盆地内充填一套火山岩—杂陆屑建造(湖南省区域地质志,1988),如在研究区的邻区浏阳秀山、衡南向阳桥一带的晚白垩纪岩层中见穿插多套火山岩,显示火山活动频繁。在株洲盆地邻区长沙果园、高桥、春华山、浏阳应家山—西楼、衡阳冠市街及株洲饼子铺等地区,均产出有玄武岩、粗面岩流喷溢及流纹质晶屑凝灰岩,呈层状、似层状,总体属碱性玄武岩系列。时间跨度较大,K-Ar年龄在70~92 Ma(湖南省岩石地层,1997)。此外,值得注意的是,在童潜明等教授所著的《株洲天元恐龙化石遗迹综合调查报告》中见火山熔岩碎屑记载。笔者在区内亦见一层厚16~35 cm的灰绿色含凝灰质(?)含砂、砾质泥岩(镜下见极少量港湾状溶蚀、似火山晶屑?),其中含丰富的恐龙化石及植物化石(图3d、c,图4c、f),恐龙类型主要有鸭嘴龙类、虚骨龙类及蜥脚类,以零散的骨骼化石为赋存特点;植物主要为小型鳞片状松柏类的穹孔假拟节柏和假拟节柏(未定种),这是湘东地区戴家坪组

表1 株洲天元地区上白垩统戴家坪组砾岩层的砾性特征

Table 1 The compositional features of Daijiaping gravels of Upper Cretaceous in Tianyuan, Zhuzhou

岩性	砾石统计层位											
	第1层		第3层		第8层		第9层		第12层		第14层	
	F	单位/%	F	单位/%	F	单位/%	F	单位/%	F	单位/%	F	单位/%
板岩类	93	49	18	6	12	4	7	5	14	9	4	2
灰岩	0	0	141	46	193	62	100	63	17	10	28	12
花岗岩	0	0	0	0	32	10	9	6	17	10	33	14
玄武岩	0	0	0	0	3	1	4	2	2	1	2	1
粉砂岩	61	32	123	40	24	8	11	7	9	6	119	52
硅质岩	7	4	9	3	21	7	13	8	88	54	7	3
石英岩	16	9	12	4	16	5	11	7	14	8	35	15
其他	11	6	3	1	9	3	3	2	3	2	2	1
合计	188	100	306	100	310	100	158	100	164	100	230	100

首次发现的可供鉴定的上白垩统中的植物化石。它们与恐龙化石中的蜥脚类、似鸟龙进步的虚骨龙类(如驰龙科)、鸭嘴龙都属于晚白垩世化石中的标准分子,丰富了其古生物地层学资料。

3.4 震积地质记录

株洲天元地区处于区域性汨罗—宁乡—邵阳和浏阳—株洲至衡阳深断裂之间,该两条断裂被公认为湖南北部的孕震活动断裂,史前有多次地震发生^⑨。地震沉积事件记录是指在不超过约30 m的深度范围内,软-半固结沉积物在强地震作用下,发生错断、塌落沉陷、液化卷曲、底辟滑动、震裂及震碎等同沉积变形,从而形成具同沉积变形构造的震积岩(Wheeler, 2002; 田洪水等, 2005; 乔秀夫等, 2006, 2008, 2009; Moretti et al., 2007; 杜远生等, 2007),该类型的岩石对地震事件具有较好的指示作用。由于陆相环境中,河流平衡剖面的波动较大,加之沉积速率较高,先期沉积的地震记录亦容易被后期沉积过程改造,甚至破坏殆尽;其次,在辫状河三角洲环境中,由于粒度较粗(>3 mm)而难以发生液化现象(赵灿等, 2012)。因而,在对湖南的白垩纪盆地充填物质的记录中,鲜见有对该事件的记载。受城区内露头分布的局限,本次在研究区内仅见有少数几种地震成因的同沉积变形,以负载构造、液化卷曲、震积角砾、震褶曲和塌落沉陷为主(图3)。

3.4.1 负载构造及枕状体

该构造在研究区富化石层段比较常见,属于软沉积物变形构造。其典型的识别特征是该构造体上、下均发育有未变形层。研究区的负载构造大小不等,一般大的高28~43 cm,宽30~65 cm,发育于中砾岩层中,属于一种辫状河流相的杂色中砾岩,在地震活动中受到振动、进而在重力作用下,向下沉落入下伏洪泛平原相比较软的、未固结的细粒砂、泥岩中而形成。该负载构造位于岩层的底部,呈明显的突起,区别于底蚀构造:负载构造内部的砾石亦呈“下落”的滑动变形特点,砾岩透镜体长轴平行于下滑方向(图3g, h)。

负载构造上与母岩相连,若进一步塌陷,与母岩层断开,则形成独立的、形态呈枕状或不规则状的块体,是地震负载体坠落所致。研究区内枕-球状构造可见于第3、5、8层,多数块体直径在20~40 cm,与母岩区虽已被细粒物质隔离,但在形态上

基本能镶嵌、吻合(图3j)。

3.4.2 震积角砾岩

研究区的震积角砾岩亦主要见第3、5层,从中可以看出,该角砾大小为0.8~6 cm,成分比较单一,角砾呈拉长状或弯曲的痕迹,各角砾间呈现出叠置的特点,角砾的产状与岩层产状不协调,呈现出震积不整合接触的特点(图3l)。显然,这些角砾的表面特征反映出没有经过搬运的特征,属于原地、原位的。

3.4.3 卷曲变形和波状变形构造

区内卷曲变形主要在第3、5、12层发育(可见露头内)。该卷曲变形发育在单层的顶部,呈“Z”或“反S”形,主要由一套液化的细-中粒砂岩构成,各纹层比较连续,没有见错断或角砾化现象。该变形层向岩层的底部逐渐变正常,向顶部扭曲细层被上覆层截切(图3i, k),是在一个层内的层理揉皱现象。

波状变形构造常与卷曲变形相伴随。研究区内含化石层段的波状变形是含水砂岩在水平状态下经过塑性挤压变形的结果。该变形总体构成一个小型复式背形弯曲,向形弯曲相对较宽,为8~20 cm,高2~6 cm,背形弯曲宽3~6 cm,类似阶梯状起伏(图3k),属于小尺度的褶皱。

3.4.4 液化砂岩脉

在研究区内见有少量由沉积物液化流动侵位形成的脉状构造,多见于第7层,该液化砂岩脉呈圆柱状,垂直岩层面分布,岩性以中-细砂岩为主,围岩为水平泥质条带极为发育的泥质粉砂岩。脉体宽3~5 cm,长8~12 cm,与前人所称的长而窄的凹槽型砂砾岩体(何碧竹等, 2011)不同的是,该柱状岩脉与下伏母岩层相连,具有往垂向上液化、流动、侵位的特征(图3m),至单层顶部而截止。

4 讨论

4.1 古环境演化

4.1.1 砾石的统计方法

研究区砾岩层多呈厚层状,垂向上河道砾岩层叠置或显二元结构特点,扁平状砾石定向性明显,为株洲盆地古水流方向判断提供了良好的研究条件。按研究区地层剖面垂向序列,分别对剖面中的第1、3、8、9、12、14层砾石层进行测量与统计。在一个单层内,选择1 m×1 m的正方形范围,随机统

计68~120颗砾石进行统计,统计参数包括含量、扁度、球度、磨圆度、砾态比值、风化度等6个方面(表1,图2)。其中,磨圆度 P 分为4级(0级—棱角状、1级—一次棱角状、2级—一次圆状、3级—圆状),均以百分数表示(表2,图2)。扁度 $F(F=(a+b)/2c)$ 和球度 $B(B=\sqrt{\frac{abc}{a}})$, a 、 b 、 c 分别代表砾石的 a 轴、 b 轴、 c 轴的长度;砾态参数是磨圆度的综合指标,其表示方法为扁度与球度的比值(章泽军,1995;刘训等,2002;韩建恩等,2005;王建强等,2011;张义平等,2015)。风化程度 W 仍划分为4级,以目估法(0级—未风化、1级—弱风化、2级—中等风化、3级—强风化)表示。

4.1.2 统计结果

通过砾石特征统计显示(表1),岩层中自下而上的砾性变化具明显规律性,以第6层灰绿色含凝灰质泥岩层为界,下伏砾岩层中未见花岗岩类砾石,且碳酸盐岩类砾石含量呈剧烈震荡;上覆砾岩层中板岩砾石迅速减少,硅质岩砾石亦变化显著(图2)。易风化类砾石如碳酸盐岩类、板岩类砾石的迅速减少反映出该时期株洲湖盆总体处于抬升萎缩时期,由于搬运距离的变化而导致岩屑组分中成熟度增高。

在砾态方面,从表2可以看到,研究区戴家坪组含化石层段砾石的扁度在1.38~2.56,球度在0.58~0.73,磨圆度在23.52%~57.5%,砾态参数比值介于1.89~4.41,充分的表明区内砾石以次棱角状为主,次圆状次之,少量棱角状,磨圆中等;但自下而上扁度值总体逐渐变小,而球度及磨圆度则依次加大,说明株洲天元地区的砾岩有向上部磨圆度变好的趋势,这也和岩屑组分成熟度增高的变化规律相一致;砾岩的风化程度总体较弱,多在1~2级之间,这

与白垩纪以来气候较干旱,物理风化较弱及快速堆积相关。

4.1.3 物源区及古流向分析

古流向分析是古地理环境分析的重要环节之一。通过砾石最大扁平面(ab 面)的产状要素,尤其是砾岩层中的叠瓦状构造或长条形砾石,对古流向具有很好的指示意义。本次研究重点选取区内符合上述特征的、多个点位进行了测量,每个测量点的砾石总数不低于68颗,保证测量结果准确可靠,最终将数据绘制成古流向玫瑰花图(图2)。结果显示该套砾岩沉积时古水流方向主要为北、北东和少量北东东向,不同层位中砾向有所变化。同时,具指向特征的交错前积纹层亦指示株洲天元地区总体为北流水系(向北或北东方向)。区域资料亦表明^⑥,株洲盆地由龙头铺往北东至南塘桥一带厚度显著减薄,砾石含量减少,砾径变小,显示出株洲盆地在此期间由南西向北东迁移。多项资料高度吻合,均有力地支持了北流水系的观点。

在物源方面,通过对比白垩纪时期株洲盆地周缘的基岩地层,根据古流向的测定结果,笔者推测,株洲天元恐龙化石埋藏区戴家坪组砂砾岩段的物质主要来自盆地南侧、南西侧。各岩层的砾石组分中,板岩类、碳酸盐岩等砾石含量较高,成分成熟度低,而这两种砾石抵抗风化能力较弱,很难进行长距离搬运,一般只在山前堆积体(赵澄林等,2001;刘杰等,2014;彭楠等,2015),说明该套砾岩离源区相对较近;综合野外考察、古流向分析等认为该套板岩类、碳酸盐岩等砾石砾岩的主要物源区为毗邻天元地区西南部的新元古代(板岩)及晚古生代地层(灰岩)。研究化石赋存围岩的物源性质,目的是去探究恐龙动物群的来源方向、恐龙生活区与埋藏区

表2 株洲天元地区上白垩统戴家坪组砾岩层的砾态特征

Table 2 The psephitic features of Daijiaping gravels of Upper Cretaceous in Tianyuan, Zhuzhou

砾 态	砾石统计层位					
	第1层	第3层	第8层	第9层	第12层	第15层
F(扁度)	2.56	2.07	1.38	1.66	1.89	1.73
B(球度)	0.58	0.64	0.73	0.69	0.66	0.71
P(磨圆度)	23.52	38.18	46.32	57.5	43.14	45.87
F/B(砾态比值)	4.41	3.23	1.89	2.41	2.86	2.44
W(风化度)	3	1	2	1	2	2

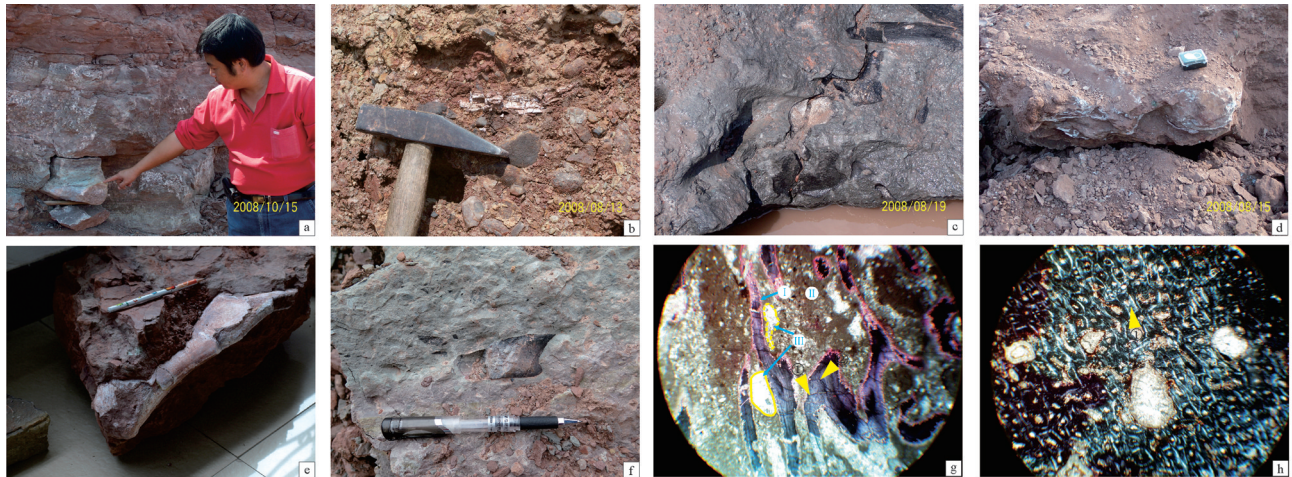


图4 株洲天元恐龙化石宏观埋藏及镜下特征

a—砂砾岩层中的骨骼化石及恐龙化石的发现者;b—砾岩层中的恐龙牙齿化石(第3层);c—灰绿色含凝灰质砂泥岩中的骨骼化石,骨骼无序堆积,长轴近于垂直,骨骼表面呈黑色调(第6层);d—恐龙头骨碎片,埋藏于洪积砂泥岩层中;e—鸭嘴龙尺骨化石,见龟裂及壳落现象,埋藏于洪积砂泥岩层中;f—恐龙骨骼化石,长轴顺层方向,两端少量磨蚀,埋藏于灰绿色含凝灰质砂泥岩层中;g—骨骼化石纵切面(+),见哈弗斯管向四周的放射状裂痕,其中①代表“V”形裂缝;②代表呈120°交角的聚缩裂缝;I、II、III分别代表3个胶结世代;h—骨骼化石横切面(+),见骨小梁中磷灰石骨板环绕髓隙同心环状分布,骨隙相通,骨梁上分布有细小方解石圆点

Fig.4 Taphonomy of dinosaur fossil horizons, Tianyuan, Zhuzhou

a-Discoverer of dinosaur fossils in sandy conglomerate; b-Dinosaur teeth fossils in sandy conglomerate (the 3rd layer); c-Stones fossils in celadon tuffaceous sandy mudstone; d- Dinosaur skull fragments buried in diluvial sand mudstone; e-The hadrosaur's ulna fossil, having cracks, buried in diluvial sand mudstone; f-Dinosaur stone fossils buried in celadon tuffaceous sandy mudstone; g- Stone fossil longitudinal section (+), haversian canals radial dilacerations observed; ① V-shape Cracks ;② Shrinkage crack at a 120° obliquity; I, II, III respectively represent the three filled generations; h-Stone fossil transverse section(+), apatite bone cement plates exhibiting concentric ring distribution in bone-trabecula

的距离以及恐龙死亡前的地质构造背景等三个方面的问题。通过物源区的分析,可以明确以下几点:(1)恐龙动物群生活在株洲天元地区的南部,天元地区属于汇水盆地,植被相对繁盛(以区内出现大量植物化石为证,而湖南省其他地区的同期地层中未见报道),各群体可能存在由南往北的迁徙,使分散的种群集中靠拢(如第6层有霸王龙、似鸟龙、鸟脚类、蜥脚龙和鸭嘴龙5个类群);(2)恐龙的生活栖息地较物源剥蚀区来说,应更靠近天元化石埋藏区,因此,虽然恐龙骨骼的埋藏类型为异地埋藏,但搬运不远;(3)恐龙生存的环境较为恶劣,山崩、泥石流等局部事件常有发生。基于上述认识,笔者推断:恐龙生活在沿NE-SW向展布的狭长湖泊的南岸,随着环境的恶化,不断集群死亡,并在构造活跃期,由于山洪暴发而被搬运至盆地埋藏。

4.2 恐龙死亡的原因与埋藏过程

4.2.1 死亡原因

中生代以恐龙为主的古生物灭绝存在多种理论推导和假说,均有各自的理论依据(戎嘉余和詹仁斌,2006;戎嘉余和黄冰,2014;王能盛等,2015)。

目前,主要存在两种不同的灭绝观点:即灾变论假说和渐变论假说。灾变论假说有行星撞击说、气温下降说、生物碱中毒说、食物链中断说、地球磁场异常说、火山爆发导致碳循环紊乱说、星击火灾说、海平面下降说、基因突变说及2600年周期说等十几种假说(柴之芳等,1986;赵资奎等,1991;马配学等,1999;陶奎元等,1997;陈丹玲等,2001;田晓雪等,2005;戎嘉余等,2006;2014)。这些灾变结果亦有许多地质现象及证据支持,如行星撞击说,在北到阿拉斯加地区,南到南极洋深海钻探剖面,在全球范围内均发现了铱异常现象(Sharptometal.,1992;马配学等,1999;Schulteetal.,2010)。又如火山爆发说,认为火山爆发时可喷出HF、H₂S、Cl₂、CO等有毒气体,而且常伴随有地震、山崩和海啸的发生(陶奎元等,1997;田晓雪等,2005;朱日祥等,2009,2011)。渐变论的观点有竞争失败说、生殖功能衰退说、激素异常说、哺乳动物偷蛋说等(柴之芳等,1986;赵资奎等,1991;陈丹玲等,2001;Keller,2012;Kelleretal.,2012)。综合起来,形成了极为丰富的死亡和灭绝假说。

本文从晚白垩世株洲湖盆的地质背景(古地理、古环境及古气候)出发,结合区内自下而上产出多层恐龙化石的客观事实,本文初步推测株洲地区的恐龙死亡既可能有渐变的因素(气候变迁、湖水咸化、食物短缺),也可能有灾变因素(火山爆发、洪水泛滥),这两方面相互作用,可能共同导致了株洲地区恐龙种群的衰亡。

(1)晚白垩世中晚期恐龙生活的环境恶化程度加剧。研究区恐龙赖以生存的生态环境恶化,体现在两个方面:气候变迁与湖盆萎缩。气候方面:首先,区域上华夏山脉隆升加剧了对东南沿海海域水汽向内陆的运移,加剧干旱效应;其次,研究区出现钙质结核(图3c),第6层获得光面三角孢(Leiotriletes),苏铁粉(Cycadopites)和云杉粉(Piceapollenites)各1粒。同时,恐龙化石薄片显示骨板中见许多裂隙,主要沿哈弗斯管壁分布,呈开口向内的“V”形特点;另在骨小梁中间见有许多互呈120°交角的聚缩裂缝(图4g、h),这些特征均反映该时期气候已完全沦为强烈干旱气候条件。湖盆方面,在区内见有暴露地质记录(古风化碎屑物质),基准面有抬升的表现;加之含化石段岩层自下而上砾石组分的成熟度增高表明,株洲湖盆在该时期有明显的萎缩,湖盆水域面积减小,局限低能水域在湖退的背景下初步沼泽化。株洲—衡阳地区由原来宽而浅、呈北北东—南南西向展布的狭长形淡水湖泊,逐步萎缩(图1)。广阔的湖岸线及湖泛平原等适宜恐龙动物群栖息、繁衍的场所不复存在,这无疑是导致恐龙种群衰落的一个重要外部因素。另外,在湖南的晚白垩世地层中,除了天元地区发现了植物化石外,其他地区均未见报道,这也从侧面反映出该时期出现食物短缺,也加剧了恐龙动物群的衰亡进程。

(2)山洪暴发与洪水泛滥等突发事件可能给局部地区的恐龙动物群造成灾难。区内化石层总计约6层。在“正常”紫红色岩层中,可见有少量恐龙化石,如第3层、第5层、第9层等(图2),主要类型有:蜥脚类、鸭嘴龙、暴龙类及小型虚骨龙等恐龙的零散骨骼化石。比较巧合的是,这些层中与前述沉积事件相关度较高,其中以洪水事件、地震事件为主,如第3层的洪积砾岩相中见明显的枕—球状构造及震积角砾岩等震积构造,由此,笔者初步推测恐

龙的死亡可能由于构造活动中,地震等因素造成山体松垮(如汶川8.0级大地震,造成了成都平原西侧龙门山前缘多次山体滑坡、泥石流事件),并在一次大降水中发生泥石流,将栖息于株洲湖盆周缘的恐龙动物群掩埋而死亡。造成恐龙死亡的类似案例有许多,如山东诸城恐龙化石埋藏区,柳永清等(2010,2011)、旷红伟等(2014)通过对化石埋藏地沉积相的研究,认为恐龙的死亡是动物群穿越洪泛平原时遭遇大规模山体滑坡或泥石流所致。姜杨等(2011)亦提出季节性山洪暴发及河流泛滥是导致浙江天台盆地恐龙死亡的主要原因。

(3)邻区火山的喷发可能给株洲地区的恐龙动物群造成毁灭性的打击。从区内所产化石层的围岩来看,在化石最富集、类型最多、最集中产出的第6层,岩性亦较为特殊,主要为灰绿色、灰褐色含凝灰质砂质泥岩(?),含大量的植物化石,以松柏类为主。化石表面均呈黑色,恐龙类型有鸭嘴龙、暴龙类、蜥脚类等,相邻地层中还可见有虚骨龙、似鸟龙、兽脚类、鸟脚类、和龟鳖类等。显然,松柏类与数量大、种类多的恐龙化石集中产出在灰绿色地层中,两者相关性极高,暗示动植物群的死亡与火山作用之间可能存在某种紧密关联;加之该时期,无论是从全球板块活动的宏观维度,还是从株洲地区及邻区的区域性视角(如邻区的衡阳盆地同时代地层中见火山碎屑岩和玄武质熔岩穿插,并见火山弹,直径可达35 cm),均存在广泛的岩浆—火山事件(湖南省区域地质志,1988;康铁笙等,1996;姜杨等,2011;柳永清等,2011;俞方明等,2012;旷红伟等,2014),火山喷发出的HF、H₂S、Cl₂、CO等有毒气体,以及随同喷发过程所带出来的尘埃物质和巨大热量,将极大地破坏该时期的生态系统,这一喷发作用亦有可能是导致株洲天元地区恐龙呈集群死亡的主要原因之一。

4.2.2 埋藏过程及模型

如前所述,恐龙骨骼的搬运和埋藏与河流冲积入湖密切相关。本文通过埋藏环境(埋藏相)的探讨来追索当时的埋藏过程。埋藏相的研究主要包括沉积相和埋藏特征研究两个方面,埋藏特征又涉及骨骼化石分布、聚集样式、骨骼物理改造特征、化石形态和大小、骨骼表层特征以及化石丰度与组合等诸多方面(Brooks et al.,2009;Anthony et al.,2010;

旷红伟等, 2014)。通过对研究区恐龙化石的埋藏特征进行分析, 认为株洲天元恐龙化石遗迹区的化石主要埋藏于含沉凝灰质河漫沼泽(OB)、洪泛平原(FP)及泥石流相(DF)等几种沉积微相中, 辫状河道(BRC)中亦有少量, 分别对应了4种化石埋藏相类型: T-OB、T-FP、T-DF和T-BRC, 这些埋藏相类型都与冲积-河道入湖形成三角洲沉积体系的成因密切相关。

T-OB(含沉凝灰质河漫沼泽相)是研究区主要的埋藏类型之一, 该埋藏相中含大量的恐龙化石, 主要有鸭嘴龙、暴龙类、蜥脚类、鸟脚类等恐龙的股骨、腓骨、肋骨、肱骨、蹠骨、颈椎、尾椎及趾骨等, 种类较多, 大小不一, 大者(如股骨)直径可达22 cm, 长度约30 cm, 小者仅2~4 cm, 这些化石均保存较完整, 仅骨头两端关节腔体有少量磨蚀。无一例外的是, 化石外表均呈黑色, 内部被大量方解石充填, 局部关节腔中还可方解石晶簇(图4c)。该埋藏相中含凝灰质、化石属种多、分选极差, 含炭泥岩中混杂砾岩等特点, 均说明短时期内恐龙遭受了灭顶式灾难(以火山作用为主), 由于短暂性水流被搬运至此。

T-FP(洪泛平原相)埋藏相中化石较为丰富, 亦是区内重要的埋藏类型之一。该埋藏相所见化石主要有蜥脚类、鸭嘴龙、霸王龙及虚骨龙等恐龙的零散骨骼化石, 如尺骨、牙齿、脊椎、颈椎、坐骨等。与T-OB埋藏相不同的是, T-FP埋藏相中化石多呈灰白色, 在肱骨、股骨、尺骨等长柱形骨骼的两端, 常见有磨蚀现象, 总体保存较完整。少量鸭嘴龙尺骨由于体积大、重量大而多以滚动方式搬运, 造成了少量缺头, 骨骼表面可见壳落、裂纹现象(图4e), 这些特征均表明这些零散的恐龙骨骼在埋藏前曾经暴露, 且经历了一段搬运过程, 埋藏-保存模式可能为暴露-搬运-暴露-埋藏的反复周折过程, 但总体上搬运距离不是太远。这一埋藏环境多位于扇远端, 而前期的扇根沉积体往往成为后期前端辫状水道的二次物源, 这一特点也正好与前述T-FP埋藏相中化石被多次搬运的推论相一致。

T-BRC(辫状河道相)埋藏相的化石相对前两者略少, 该埋藏相中见有少量鸭嘴龙、蜥脚类、鸟脚类的零散骨骼, 呈“砾石状”分布于砂岩层中(图4a), 化石遭受强风化作用后均高度破碎, 如鸭嘴龙神经棘、尾椎、蹠骨等由于破损严重, 使得无法准确

地鉴定这些鸭嘴龙类化石的归属。

T-DF(泥石流相)埋藏相中见有鸭嘴龙、蜥脚类、暴龙类的零散化石, 骨骼化石呈漂浮状(图4b), 化石个体大小、形态参差不齐, 多数顺层分布。骨骼化石中磨蚀现象不及T-BRC、T-FP埋藏相, 表明其搬运距离较近。推测是由季节性突发强降水或其他地球表层事件(如地震、洪水事件)引发的泥石流沉积。

综上所述, 研究区恐龙动物群种属较多, 共计有6个恐龙类群, 其中以T-OB埋藏相中数量最多, 分布最全, 有霸王龙、似鸟龙、鸭嘴龙及未定科属的鸟脚类和蜥脚类等恐龙的骨骼化石, 保存相对完整, 区域上的火山活动是导致这一埋藏相中化石富集的主要原因。而T-FP、T-BRC均与T-DF埋藏相关系密切, 因此, 泥石流作用亦是化石得以保存、富集的重要因素之一。同时, 区内化石层数多、形状不规则(如头骨)的骨骼化石均较破碎且分散(图4d)、完全关联或半关联者少见, 指示水动力条件的作用机制, 为多期次的异地埋藏。由上述恐龙死亡原因及埋藏特征的分析, 笔者得出晚白垩世恐龙埋藏模式图(图5)。概括如下:

早白垩世, 由于板内裂隙作用, 在湖南株洲、湘潭至衡阳一带的地壳深部产生北西西方向的伸展-拆离活动, 形成了衡阳至株洲一带的湖盆雏形。随着早白垩世时期深部地壳不断的伸展作用, 株洲-湘潭-衡阳盆地范围不断扩大。此时, 盆地内湖泊广泛, 溪流密布, 气候适宜, 水草丰茂, 是动植物最优良的生态环境。即如现在的大西北有称之为“江南水乡”的绿洲一样。在株洲-衡阳湖缘一带, 栖息了一群个体庞大、种类众多的恐龙及其他动物群体(如龟鳖类)。随之而来的是, 地壳活动的剧烈导致了强烈的火山及强地震活动的发生, 这一系列事件使得恐龙赖以生存的优良生态环境发生剧变, 如古气温不断升高、水体盐度不断升高、湖泊萎缩减小, 湖泊边缘荒漠化(笔者在衡阳盆地东缘发现巨型风成沙丘, 将拟文发表)、植被锐减等, 至晚白垩世时期, 这种生态系统的恶化越来越严重, 最终导致大型脊椎动物难以适应, 种群开始缩减, 突如其来的火山喷发直接导致了区内恐龙动物群的成批死亡, 大部分死后的恐龙并非立刻被埋藏, 而是暴露了一个短暂的时期才被突发的洪水、泥石流所搬

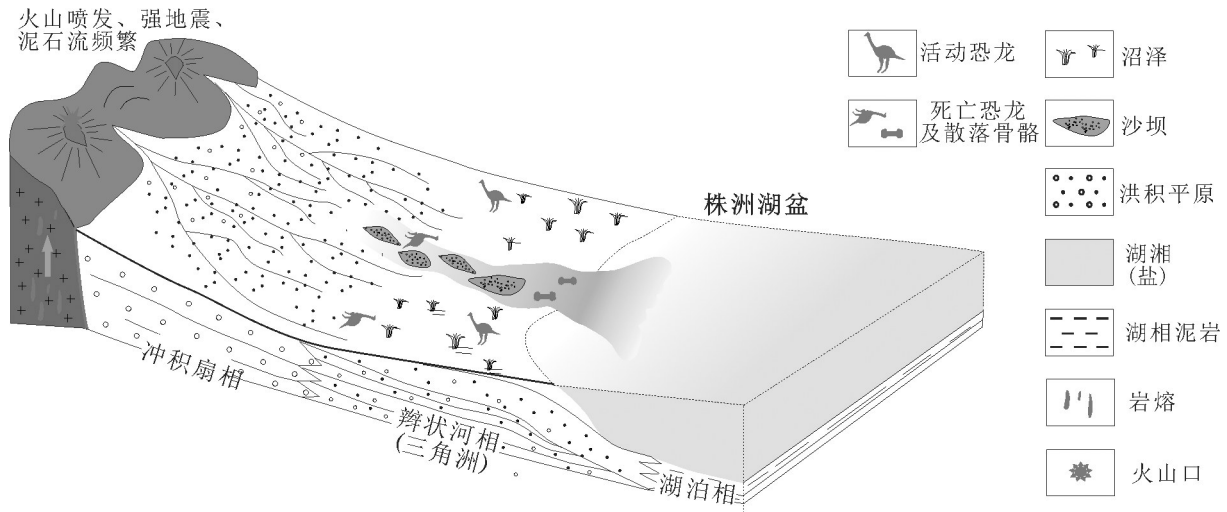


图5 湖南株洲天元地区晚白垩世恐龙死亡埋藏模式

Fig.5 Taphonomic patterns of the Late Cretaceous dinosaurs in Tianyuan district, Zhuzhou City, Hunan Province

运,最终在株洲湖盆的辫状河入湖口处卸载、埋藏。

5 结 论

(1)株洲天元恐龙化石埋藏区的含化石砂砾岩段为一套发育在湖相泥岩背景之上的冲积-辫状河三角洲相沉积体,其中识别出暴露、洪水、火山(?)、震积记录等4种不同类型的沉积地质记录,丰富了湖南省内晚白垩世时期的沉积类型。

(2)古气候及古环境分析认为,该时期区内气候类型为干旱的热带、亚热带气候。恐龙主要生活在NE-SW向展布的狭长湖泊的南西岸,此地水草丰茂,宛如大西北的“江南水乡”之绿洲环境。

(3)初步推测恐龙的死亡可能由地震、滑坡、洪积、火山作用等一系列相连贯事件所导致。识别出4种化石埋藏相类型:T-OB、T-FP、T-DF和T-BRC,这些埋藏相类型都与三角洲沉积体系密切相关,构建了区内恐龙死亡埋藏模型。

致谢:在本次研究过程中,得到了中国地质大学韩凤禄教授的建议;湖南省地质调查院陈俊、马铁球高级工程师等专家及湖南省地质研究所刘钟伟、王根贤等教授均做了大量调查工作,为本文的研究提供了许多实物资料;室内工作得到了马慧英、刘南等同志的帮助;野外地质工作,得到了株州市国土局、湖南省地质博物馆各位领导的帮助和支持,在此一并表示衷心感谢!

注释

- ① 湖南省地质研究所.株洲天元恐龙化石遗迹综合调查报告,2008.
- ② 湖南省地质博物馆.湖南省地质调查院.株州市天元区恐龙化石遗迹保护区调查报告,2013.
- ③ 湖南省地质调查院.城市区域地质调查报告(1:50000株州幅),1988.

References

- Anthony R F, Paul J M, Peter P F. 2010. Taphonomy and sedimentologic interpretations of dinosaur-bearing Upper Cretaceous Strata of the Prince Creek Formation, Northern Alaska: Insights from an ancient high-latitude terrestrial ecosystem[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 295(3): 376-388.
- Bai Daoyuan, Jiang Wen, Zhong Xiang, Xiong Xiong. 2015. Mesozoic-Cenozoic structural deformation characteristics of Yuanling-Mayang Basin and regional tectonic setting[J]. *Geology in China*, 42(6):1851-1875(in Chinese with English abstract).
- Baker V R. 1987. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events[J]. *Journal of Hydrology*, 96:79-99.
- Brinkman D B. 1990. Paleoecology of the Judith River Formation (Campanian) of Dinosaur Provincial Park, Alberta, Canada: Evidence from vertebrate microfossil localities[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1990, 78 (1):37-54.
- Brooks B B, David A E, Rod D S, Brent W G, Kenneth L S. 2009. Taphonomy of debris-flow hosted dinosaur bonebeds at Dalton

- Wells, Utah(Lower Cretaceous, Cedar Mountain Formation, USA)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280(1):1-22.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan Province.1997. *Stratigraphy(Lithostractic) of Hunan Province*[M]. Wuhan:China University of Geosciences Press, 249-260(in Chinese).
- Chai Zhifang, Ma Sulan, Mao Xueying, Zhou Lei, Ouyang Ziyuan. 1986. Elemental correlation in Ir-rich Cretaceous and Tertiary boundary layers[J]. *Geological Review*, 32(1):16-23(in Chinese with English abstract).
- Chen Danling, Xue Xiangxu, Zhang Yunxiang, Yue Leping. 2001. The geochemical features of the Cretaceous Tertiary strata in Shanyang Basin, Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest University*, 31(2): 157-161(in Chinese with English abstract).
- Chen Hongde, Zhang Jinquan, Liu Wenjun. 1994. Structure of Youjiang Basin in Devonian- Carboniferous Period and its evolution of lithofacies and palaeogeography[J].*Guangxi Geology*, 7(2):15-23(in Chinese with English abstract).
- Chen Piji, Li Wenben, Chen Jinhua, Ye Chunhui, Wang Zhenshen, Yan Bing, Sun Dongli. 1982. Sequence of fossil biotic groups of Jurassic and Cretaceous in China[J].*Science in China(Series B)*, (6):558-565(in Chinese).
- Du Yuansheng, G Shi, Gong Yiming, Xu Yajun. 2007. Permian soft-sediment deformation structures reLated to earthquake in the suthern Sydney basin, eastern Australia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(4):511-518(in Chinese with English abstract).
- Duan Qifa, Tu Bing, Shang Chaoyang, Zhao Xiaoming, Bai Yunshan. 2012. Discovery of from the Qumalai basin Qinghai and its geological significance[J]. *Journal of Stratigraphy*, (01):31-36(in Chinese with English abstract).
- Egerton V M, Novas F E, Dodson P, Lacovara K. 2013. The first record of a neonatal ornithopod dinosaur from Gondwana[J]. *Gondwana Research*, 23:268-271.
- Godefroit P, Motchurova-Dekova N.2010.Latest Cretaceous hadrosauroid (Dinosauria:Ornithopoda) remains from Bulgaria[J]. *Comptes Rendus Palevol*, 9(4):163-169.
- Grigorescu D. 2010. The Latest Cretaceous fauna with dinosaurs and mammals from the Hateg basin: A historical overview[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 293:271-282.
- Guan Shaozeng. 1989. On the age of the Dongtang Formation in the Hengyang basin of Hunan, and the Cretaceous and Tertiary boundary[J]. *Acta Geologica Sinica*, (1):59-72(in Chinese with English abstract).
- Han Fenglu, Xing Hai, Tong Qianming, Corwin Sullivan, Xu Xing, Wu Rui, Hu Nengyong, Tong Guanghui. 2017. Preliminary study of a diverse dinosaur assemblage from the Upper Cretaceous of Zhuzhou, Hunan Province[J].*Acta Palaeontologica Sinica*, 56(2): 225-237(in Chinese with English abstract).
- Han Jianen, Yu Jia, Meng Qingwei, Du Jianjun, Zhu Dagang, Meng Xiangang, Shao Zhaogang.2005.Analysis of Quaternary gravels in the Zhanda Basin, Ngari area, Tibet, China[J].*Geological Bulletin of China*, 24(7):630-636(in Chinese with English abstract).
- He Bizhu, Qiao Xiufu, Tian Hongshui, Chen Shuqing, Zhang Yanxia.2012. Paleoeearthquake events of Early Cretaceous Laiyang stage and dinosaur migration in Zhucheng, Shandong Province, EasternChina[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(6):1320-1330(in Chinese with English abstract).
- He Bizhu, Qiao Xiufu, Tian Hongshui, Zhang Yanxia. 2011. Palaeoearthquake event and dinosaur fossil burial of the Late Cretaceous in Zhucheng of Shandong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 13(6):615-666(in Chinese with English abstract).
- Horner J R, Goodwin M B, Myhrvol N.2011.Dinosaur census reveals abundant tyrannosaurus and rare ontogenetic stages in the Upper Cretaceous hell creek formation (Maastrichtian), Montana, USA[J]. *Plos One*, 6(2) :1-9.
- Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources.1988.*Regional Geology of Hunan Province*[M].Beijing:Geological Publishing House, 238-252(in Chinese).
- Jiang Yang, Qian Maiping, Chen Rong, Jiang Yangen, Zhang Yuanjun, Xing Guangfu. 2011. The Cretaceous Dinosaur Fossil Strata of the Tiantai Basin, Zhejiang Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, (03): 258-267(in Chinese with English abstract).
- Kang Tiesheng, Wang Lanfen, Wang Shicheng. 1996. Investigation of the age and geological thermal history of the strata containing dinosaurs fossile in Tianzhen County of Shanxi Province[J]. *Nuclear. Techniques*, 19(10):625-628(in Chinese with English abstract).
- Keller G, Adatte T, Bhowmick P K, Upadhyay H, Dave A, Reddy A N, Jaiprakash B C.2012.Nature and Timing of Extinctions in Cretaceous- Tertiary Planktic Foraminifera Preserved in Deccan Intertrappean Sediments of the Krishna-Godavari Basin.
- Keller, G. 2012. The Cretaceous-Tertiary mass extinction, chixculub impact, and deccan volcanism[M]//*Earth and Life*.Springer Netherlands, 449 - 452.
- Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Dong Chao, Peng Nan, Xu Huan, Wang Baohong, Zhang Peng, Wang Kebai, Chen Shu Qing, Zhang Yanxia. 2014. Research on taphonomy of Late Cretaceous dinosaurs in Zhucheng, eastern Shandong, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, (8):1353-1371(in Chinese with English abstract).
- Liu Gengwu. 1999. Discovery of Cretaceous palynological assemblage from the western Sichuan Plateau, SW China and its geological significance[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, (1):58-64(in Chinese with English abstract).
- Liu Jie, Cao Yingchang, Fan Tailiang, Liu Huimin. 2014. An analysis of the source system and its effect on the reservoir of the middle-

- lower submember of 3rd member of Shahejie Formation in Minfeng area, Dongying depression[J]. *Geology in China*, 41(4):1399–1410 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xun Wang Jun Zhang Zhaochong, Wang Yong. 2002. Relation between the components of quaternary molasse and uplift of the Qinghai–Tibet Plateau—preliminary understanding of the results of measurements of the quaternary pebble composition at the Kokyar Section, Yecheng, Xinjiang[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(11):759–763(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Peng Nan, Ji Shuan, Wang Xuri, Chen Shuqing, Zhang Yanxia, Xu Huan. 2010. Sedimentary facies and taphonomy of Late Cretaceous deaths of dinosaur, Zhucheng, eastern Shandong[J]. *Geological Review*, 56(4):457–468(in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 9–24(in Chinese with English abstract).
- Ma Peixue, Gao Honglin, Hou Quanlin. 1999. Abundance anomalies and distribution patterns of platinum–group elements at the K/T boundary and extraterrestrial impact origin[J]. *Advance in Earth Sciences*, 14(1):24–30(in Chinese with English abstract).
- Moretti M, Sabato L. 2007. Recognition of trigger mechanisms for soft–sediment deformation in the pleistocene lacustrine deposits of the Sant–arcangelo Basin(southern Italy): Seismic shock vs. overloading[J]. *Sedimentary Geology*, 196:31–45
- Peng Nan, Liu Yongqing, Kuang Hongwei, Xu Huan, Zhang Peng, Chen Jun, An Wei, Wang Nengsheng. 2015. Provenance of early Cretaceous Laiyang Group in Jiaolai Basin and its significance[J]. *Geology in China*, 42(6):1793–1810(in Chinese with English abstract).
- Pfretzschner H U R, Tütken T. 2011. Rolling Bones–taphonomy of Jurassic dinosaur bones inferred from diagenetic microcracks and mineral infillings[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 310: 117–123.
- Qiao Xiufu, Li Haibing. 2008. Pillow, ball– and–pillow structures: Paleo–seismic records within strata[J]. *Geological Review*, 54(6): 721–730(in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Li Haibing. 2009. Effect of earthquake and ancient earthquake on sediments[J]. *Journal of Palaeogeography*, 11(6): 593–610(in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu, Song Tianrui, Gao Linzhi, Li Haibing, Peng Yang, Zhang Chuanheng, Zhang Yuxu. 2006. Seismic Records in Strata(Ancient Earthquakes)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–263(in Chinese with English abstract).
- Qin Xihu. 1999. Sedimentary events and their record in the Formation[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 19(3):44–50(in Chinese).
- Rong Jiayu, Huang Bing. 2014. Study of mass extinction over the past thirty years[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 44:377–404(in Chinese).
- Rong Jiayu, Zhan Renbin. 2006. Re–evaluation of survivors, Lazarus Taxa, and refugia from mass extinction[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6):187–198(in Chinese with English abstract).
- Russell L. Wheeler. 2002. Distinguishing seismic from nonseismic soft–sediment structures: Criteria from seismic–hazard analysis[C]//Ettensohn F R, Rast N, Brett C E(eds.). *Ancient Seismites*. Geological Society of America Special Paper, 359:1–11.
- Peter Schulte, Laia Alegret, Ignacio Arenillas, Jose A Arz, Penny J. Barton, Paul R. Bown, Timothy J Bralower, Gail L Christeson, Philippe Claeys, Charles S Cockell, Gareth S Collins, Alexander Deutsch, Tamara J Goldin, Kazuhisa Goto, José M Grajales–Nishimura, Richard A F Grieve, Sean P S Gulick, Kirk R Johnson, Wolfgang Kiessling, Christian Koeberl, David A. Kring, Kenneth G MacLeod, Takafumi Matsui, Jay Melosh, Alessandro Montanari, Joanna V Morgan, Clive R Neal, Douglas J Nichols, Richard D Norris, Elisabetta Pierazzo, Greg Ravizza, Mario Rebolledo–Vieyra, Wolf Uwe Reimold, Eric Robin, Tobias Salge, Robert P Speijer, Arthur R Sweet, Jaime Urrutia–Fucugauchi, Vivi Vajda, Michael T. Whalen, Pi S. Willumsen. 2010. The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous–Paleogene Boundary[J]. *Science*, 327:1214–1218.
- Virgil L Sharpton, G Brent Dalrymple, Luis E Marín, Graham Ryder, Benjamin C. Schuraytz & Jaime Urrutia–Fucugauchi. 1992. New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary[J]. *Nature*, 359:819–821.
- Tao Kuiyuan, Zhao Yu. 1997. Volcanology and Environment[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 18(1):3–5(in Chinese with English abstract).
- Tian Hongshui, Wang Jinguang, Lu Mingying, Wang Lifa. 2005. Seismic records in Paleogene alluvial layers in Anqiu, Shandong[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3):75–81(in Chinese with English abstract).
- Tian Hongshui, Zhang Zengqi, Zhang Banghua, Du Shengxian, Guo Guanjun, Lv Mingying. 2006. Records of paleoseismic events in the red–silk stone bed in Linqiu, Shandong[J]. *Geology in China*, 33(5):1137–1143(in Chinese with English abstract).
- Tian Xiaoxue, Luo Kunli, Tan Jianan, Li Ribang. 2005. Progress on the K/T boundary: The relation between chemical elements abnormality and dinosaurs extinction[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 22(6):667–675(in Chinese with English abstract).
- Tong Guanghui, He Anguo. 2015. Comparison of dinosaur fossils strata between Zhuzhou Basin and Xixia Basin[J]. *Land & Resources Herald*, 12(2):16–19(in Chinese).

- Wang Jianqiang Jia Nan, Liu Chiyang, Qiu Xinwei, Zhao Hongge, Guo Zhen. 2011. Fabric analysis of Yijun ravel of Lower Cretaceous in the southwestern Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(2):226–234(in Chinese with English abstract).
- Wang Nengsheng, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Peng Nan, Xu Huan, Zhang Peng, Wang Mingwei, Wang Baohong, An Wei. 2015. Taphonomic characteristics of the Late Cretaceous cluster dinosaur fossils in eastern China and comparison between domestic and abroad[J]. *Journal of Palaeogeography*, 17(5):593–610(in Chinese with English abstract).
- Yichang Institute of Geology and Mineral Resource. 1979. Cretaceous to Early Tertiary Lithofacies Paleogeography of South Central China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–130(in Chinese).
- Yin Xiulan, Yang Tiannan. 2005. Seismites in the Laiyang Group in the Jiaozhou–Laiyang Basin, Shandong Province, and their tectonic implications[J]. *Geological Review*, 51(5):502–506(in Chinese with English abstract).
- Yu Fangming, Wang Lei, Du Like, Zou Xi, Wang Guoqiang, Zhang Huan. 2012. Distribution of dinosaurs and their egg fossils in the Cretaceous basins Zhejiang Province[J]. *Journal of Stratigraphy*, (1): 77–88(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yiping, Xiao Wenxia, Zhang Jin, Chen Xuanhua, Zhang Beihang, Zhao Heng, Wang Yannan, Li Jiangyu, Shi Jianjie. 2015. A discussion on the provenance and age of Xiangshan Group in eastern Hexi Corridor[J]. *Geology in China*, 42(6):1774–1792(in Chinese with English abstract).
- Zhang zhejun. 1995. The fundamental principle and method for defining the proluvial fans in a small red Basin according to the statistics of gravels[J]. *Regional Geology of China*, 14(2):181–188 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhili, Cai Xiyao, Zhang Ming, Li Jingchang, Zhang Yin. 2014. An analysis of the relationship between types of ostracoda shell ornaments and shell shapes and the environment from Late Cretaceous Qingshankou Formation to 1st Member of Nenjiang Formation in Songliao Basin[J]. *Geology in China*, 41(1):135–147 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Biequan. 1982. Two species of dinosaur egg fossils from the Upper Cretaceous of Taoyuan[J]. *Hunan Geology*, (01): 55–56, 103 (in Chinese).
- Zhao Can, Li Xubing, Li Zhihong, Yu Yushuai, Zhang Hua, Liu An. 2012. Characteristics and geological significance of seismites of the Doushantuo Formation in Xikou, Hunan Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(6):1032–1041(in Chinese with English abstract).
- Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. 2001. Sedimentary Petrology [M]. Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Zhao Zikui, Ye Jie, Li Huamei, Zhao Zhenhua, Yan Zheng. 1991. Extinction of the dinosaurs across the Cretaceous–Tertiary Boundary in Nanxiong Basin, Guangdong Province [J]. *Vertebrate Palasiatica*, 29(1):1–20(in Chinese with English abstract).
- Zhu RiXiang, Chen Ling, Wu Fuyuan, Liu Junlai. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 41(5): 583–592(in Chinese).
- Zhu Rixiang, Zheng Tianyu. 2009. Destruction geodynamics of the North China Craton and its Paleoproterozoic plate tectonics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 1950–1961(in Chinese).

附中文参考文献

- 柏道远, 姜文, 钟响, 熊雄. 2015. 湘西沅麻盆地中生代构造变形特征及区域地质背景[J]. *中国地质*, 42(6):1851–1875.
- 柴之芳, 马淑兰, 毛雪瑛, 周磊, 欧阳自远. 1986. 白垩系和第三系界限富铀层中的元素相关性研究[J]. *地质论评*, 32(1):16–23.
- 陈丹玲, 薛祥熙, 张云翔, 岳乐平. 2001. 陕西山阳盆地白垩系—第三系界限地层地球化学特征及古气候意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 31(2):157–161.
- 陈洪德, 张锦泉, 刘文均. 1994. 泥盆纪—石炭纪右江盆地结构与岩相古地理演化[J]. *广西地质*, 7(2):15–23.
- 陈丕基, 黎文本, 陈金华, 叶春辉, 王振沈, 炎彬, 孙东立. 1982. 中国侏罗、白垩纪化石群序列[J]. *中国科学(B辑)*, 12(6):558–565.
- 杜远生, GShi, 龚一鸣, 徐亚军. 2007. 东澳大利亚南悉尼盆地二叠系与地震沉积有关的软沉积变形构造[J]. *地质学报*, 81(4):511–518.
- 段其发, 涂兵, 汤朝阳, 赵小明, 白云山. 2012. 青海曲麻莱盆地红层 *Schizaeoisporites*(希指蕨孢)的发现及其意义[J]. *地层学杂志*, (1): 31–36.
- 关绍曾. 1989. 湖南衡阳盆地东塘组的时代及白垩系与第三系的界线[J]. *地质学报*, (1):59–72.
- 国家地质总局宜昌地质矿产研究所. 1979. 中南地区白垩纪—第三纪岩相古地理及含矿性[M]. 北京:地质出版社, 1–130.
- 韩凤禄, 邢海, 童潜明, Corwin Sullivan, 徐星, 武瑞, 胡能勇, 童光辉. 2017. 湖南株洲晚白垩世恐龙化石的初步研究[J]. *古生物学报*, 56(2):225–237.
- 韩建恩, 余佳, 孟庆伟, 杜建军, 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚. 2005. 西藏阿里地区札达盆地第四纪砾石统计及其意义[J]. *地质通报*, 24(7):630–636.
- 何碧竹, 乔秀夫, 田洪水, 陈树清, 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[J]. *地质学报*, 86(6):1320–1330.
- 何碧竹, 乔秀夫, 田洪水, 张艳霞. 2011. 山东诸城晚白垩世古地震事件与恐龙化石埋藏[J]. *古地理学报*, 13(6):615–666.
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 238–252.
- 湖南省地质矿产局. 1997. 湖南省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学

- 出版社, 249-260
- 姜杨, 钱迈平, 陈荣, 蒋严根, 张元军, 邢光福. 2011. 浙江天台盆地白垩纪含恐龙骨骼及蛋化石地层[J]. 地层学杂志, 35(3):258-267.
- 康铁笙, 王兰芬, 王世成. 1996. 山西天镇含恐龙化石地层的年代及地热的裂变遗迹研究[J]. 核技术, 19(10):625-628.
- 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[J]. 地质学报, 88(8): 1353-1371.
- 刘耕武. 1999. 川西高原白垩纪孢粉组合的发现及其意义[J]. 微体古生物学报, 16(1): 58-64.
- 刘杰, 操应长, 樊太亮, 刘惠民. 2014. 东营凹陷民丰地区沙三段中下亚段物源体系及其控储作用[J]. 中国地质, 41(4):1399-1410.
- 刘训, 王军, 张招崇, 王永. 2002. 第四纪磨拉石组与青藏高原隆升的关系——对新疆叶城柯克亚剖面第四系砾石成分测量结果的认识[J]. 地质通报, 21(11):759-763.
- 柳永清, 旷红伟, 彭楠, 姬书安, 王旭日, 陈树清, 张燕霞, 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[J]. 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[J]. 地学前缘, 18(4):9-24.
- 马配学, 高洪林, 侯泉林. 1999. K/T界线铂族元素丰度异常与地外撞击事件[J]. 地球科学进展, 14(1):24-30.
- 彭楠, 柳永清, 旷红伟, 许欢, 章朋, 陈军, 安伟, 王能盛. 2015. 胶莱盆地早白垩世莱阳群沉积物源及地质意义[J]. 中国地质, 42(6): 1793-1810.
- 乔秀夫, 李海兵. 2008. 枕-球-枕构造:地层中的古地震记录[J]. 地质论评, 54(6):721-730.
- 乔秀夫, 李海兵. 2009. 沉积物的地震及古地震效应[J]. 古地学报, 11(6):593-610.
- 乔秀夫, 宋天瑞, 高林志, 李海兵, 彭阳, 张传恒, 章雨旭. 2006. 地层中的地震记录[M]. 北京:地质出版社, 1-263.
- 秦锡虎. 1999. 沉积事件及其在地层中的记录[J]. 岩相古地理, 19(3), 44-50.
- 戎嘉余, 黄冰. 2014. 生物大灭绝研究三十年[J]. 中国科学:地球科学, 44(3): 377-404.
- 戎嘉余, 詹仁斌. 2006. 论大灭绝后的幸存类型、复活效应与避难所[J]. 地学前缘, 13(6):187-198.
- 陶奎元, 赵宇. 1997. 火山学与环境[J]. 火山地质与矿产, 18(1):3-5.
- 田洪水, 王金光, 吕明英, 王立法. 2005. 山东安丘古近纪冲积层中的地震记录[J]. 沉积学报, 23(3):75-81.
- 田洪水, 张增奇, 张邦花, 杜圣贤, 郭广军, 吕明英. 2006. 山东临朐红丝石层中的古地震事件记录[J]. 中国地质, 33(5):1137-1143.
- 田晓雪, 雒昆利, 谭见安, 李日邦. 2005. K/T界线的研究进展:兼论元素演化与恐龙灭绝的可能关系[J]. 中国科学院研究生院学报, 22(6):667-675.
- 童光辉, 何国安. 2015. 株洲盆地与西峡盆地产恐龙化石地层对比研究[J]. 国土资源导刊, 12(2):16-19.
- 王建强, 贾楠, 刘池洋, 邱欣卫, 赵红格, 郭真. 2011. 鄂尔多斯盆地西南部下白垩统宜君组砾岩砾组分析及其意义[J]. 沉积学报, 29(2):226-234.
- 王能盛, 旷红伟, 柳永清, 彭楠, 许欢, 章朋, 汪明伟, 王宝红, 安伟. 2015. 中国东部晚白垩世恐龙化石集群埋藏特征及国内外对比[J]. 古地学报, 17(5): 593-610.
- 殷秀兰, 杨天南. 2005. 胶州—莱阳盆地白垩纪莱阳群中的震积岩及构造意义讨论[J]. 地质论评, 51(5): 502-506.
- 俞方明, 王磊, 杜理科, 邹曦, 王国强, 张环. 2012. 浙江白垩纪恐龙与恐龙蛋化石的时空分布[J]. 地层学杂志, (1):77-88.
- 张义平, 肖文霞, 张进, 陈宣华, 张北航, 赵衡, 王艳楠, 李江瑜, 史建杰. 2015. 河西走廊东部香山群时代和物源讨论[J]. 中国地质, 42(6):1774-1792.
- 张智礼, 蔡习尧, 张铭, 李京昌, 张莹. 2014. 松辽盆地晚白垩世青山口组—嫩江组一段介形类壳饰、壳形类型与环境关系分析[J]. 中国地质, 41(1):135-147.
- 章泽军. 1995. 根据砾石统计确定红色盆地中洪积扇的基本原理与方法[J]. 中国区域地质, 14(2):181-188.
- 赵别全. 1982. 桃源上白垩统地层中的两种恐龙蛋化石[J]. 湖南地质, (1):55-56+103.
- 赵灿, 李旭兵, 李志宏, 于玉帅, 张华, 刘安. 2012. 湖南慈利溪口震旦系陡山沱组震积岩的发现及其地质意义[J]. 沉积学报, 30(6): 1032-1041.
- 赵澄林, 朱筱敏. 2001. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社.
- 赵资奎, 叶捷, 李华梅, 赵振华, 严正. 1991. 广东省南雄盆地白垩系—第三系交界恐龙灭绝问题[J]. 古脊椎动物学报, 29(1):1-20.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学:地球科学, 41(5):583-592.
- 朱日祥, 郑天愉. 2009. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系[J]. 科学通报, 54(14):1950-1961.