

山东诸城早白垩世莱阳期古地震事件与恐龙迁移

何碧竹¹⁾, 乔秀夫¹⁾, 田洪水²⁾, 张艳霞³⁾

1) 大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037;

2) 山东建筑大学, 济南, 250014; 3) 山东诸城市恐龙文化研究中心, 山东诸城, 262200

内容提要:在诸城断陷皇华镇大山村黄龙沟存在丰富的、多样的恐龙足迹化石,在紧邻化石埋藏层下伏及上覆地层中发现了下白垩统莱阳群杨庄组多套古地震记录,主要包含波状褶皱、底劈构造、液化砂岩脉、液化角砾岩、粒序断层、卷曲变形和震积不整合等塑性、脆性软沉积物变形构造。分析表明初始沉积物、沉积相及构造作用确定了地震活动作用时形成的软沉积物变形构造类型。在早白垩世莱阳群沉积中期,地震活动具有阶段性及频发性,以单向挤压的丘-槽构造及双向挤压的波状变形为主,且后期有构造活动强度加大的特征。根据已识别的古地震记录发育及古地震活动强度分析,推测此时期发震断裂可能是断陷的南缘断裂——五莲断裂。区域构造作用使得该时期沉积环境发生变化,由湖相逐渐过渡到河流相,在突发古地震事件发生之后,在滨浅湖区域留下了丰富的恐龙迁徙足迹。古地震记录的研究,可建立古地震事件与沉积、构造演化的联系,约束构造作用的属性、频次及时限,为确定盆地及周缘构造-沉积演化历史提供证据。

关键词: 软沉积物变形构造;古地震成因;恐龙足迹化石;早白垩世;山东诸城

1958年杨钟健首次在山东莱阳发现了晚白垩世王氏群的“山东青岛龙”,1964年原地质部石油局综合研究队在山东诸城吕标公社龙骨涧的晚白垩世王氏群地层中又发现了“巨型山东龙”(一类大型鸭嘴龙恐龙化石)。至1968年由地质科学院地质研究所和地质博物馆继续发掘,先后4次共采化石约30余吨(胡承志等,1986)。之后,在诸城博物馆与地方群众的配合下,发现了小黑龙沟、臧家庄、西见屯、唐家洼等10多处恐龙化石地点,分布在诸城的中部和西南部,展现了山东诸城恐龙化石的丰富。1988年开始中国科学院古脊椎动物与古人类研究所协助山东诸城博物馆开展了以诸城库沟、龙骨涧为重点的恐龙挖掘,发现了“巨型诸城龙”,其同种个体组装的一个恐龙骨架身高9.1m,身长16.6m,是目前世界上最高大的鸟脚类恐龙个体,与“巨型山东龙”分别代表两个不同种属的恐龙类型(赵喜进等,2007)。经多年的发掘工作,发现的恐龙化石主要包括鸭嘴龙、角龙、霸王龙、甲龙、虚骨龙、秃顶龙和鸢嘴龙等,具有种类多、个体大、集中埋藏的特点。而且不仅在上白垩统发现了许多恐龙骨骼化石,还

发现了下白垩统大量的恐龙足迹等遗迹化石(李日辉等,2000,2002;邢立达等,2010)(图1)。同时,伴随着恐龙骨骼化石和遗迹化石的不断发现,对该地区白垩纪沉积地层、古地理环境、古生物发育演化、古气候等的研究也取得了重要的进展(杨钟健,1958;胡志承,1973;刘明渭等,2003;山东省第四地质矿产勘察院,2003;赵喜进等,2007;柳永清等,2010)。

诸城皇华镇大山村黄龙沟发掘区(N35°51'46.8", E119°27'32.4"),在东西长50m、南北宽52m、地层倾角为25°、面积约2600m²的下白垩统莱阳群杨庄组层面上,发现了形态各异、大小不一、深浅不同的各种恐龙足迹3000多个,主要有鸟脚类、兽脚类、蜥脚类等6种以上恐龙属种的足迹(Li Rihui et al., 2011;柳永清等,2011)。其中兽脚类恐龙足迹最多,已确认的有肉食类的霸王龙、虚骨龙足迹,植食类的鸭嘴龙、甲龙足迹。恐龙足迹多呈同向性(图1d)、有序而不杂乱,较小的鸟脚类恐龙足迹长多为10cm左右,较大的兽脚类恐龙足迹长40cm左右(图1d~1f)。推测有两种可能导致足迹的同向性特点,一种是因为有霸王龙等

注:本文为中石化科技部项目(P05036)及国土资源部行业基金项目(编号201011034)共同资助的成果。

收稿日期:2011-11-10;改回日期:2012-04-07;责任编辑:黄敏。

作者简介:何碧竹,女,1965年生。博士,研究员,主要从事盆地构造分析及油气勘探目标综合研究。Email:hebizhu@vip.sina.com。

凶猛的肉食类恐龙来袭(或突发事件),促使大批植食类恐龙仓皇溃逃所致;另一种是恐龙群体性迁徙的结果。

作者在诸城皇华镇黄龙沟恐龙足迹发掘剖面及其北部的两个地质剖面上,发现了多层古地震记录——软沉积变形构造。软沉积变形构造主要有波状褶皱、底劈构造、液化砂岩脉、液化角砾岩、粒序断层等。尤其是发现研究区的恐龙足迹恰好出现在其中一次古地震事件之后。那么,古地震记录与大量近同向恐龙足迹叠置,是否意味着一次地震之后恐龙种群整体迁移(迁入或迁出本区)?本文希望能换一种思维来解释大量近同向的恐龙足迹与地震事件的巧合,并通过研究区古地震记录研究,分析地震断裂的活动性,探讨古地震记录的诱发机制,分析古地震事件与环境的演变关系,这对深入了解胶莱盆地古地理、古构造、古生物的发育演化有重大意义。

1 诸城地区下白垩统古地震记录——软沉积变形构造

1.1 波状褶皱——“鸡蛋盒或碗状”构造的三维形态

在诸城皇华镇大山村恐龙足迹发掘点,可见层状展布的软沉积波状褶皱变形层,夹持在未变形的水平层状沉积层中(图 2),变形层与未变形层均为深灰色泥岩—粉砂质泥岩与浅灰色粉砂岩互层组成,单层厚度约 5~7cm,未变形层上可见到波痕(图 1c)。变形层典型的剖面特征是呈宽缓的向形和较窄的背形相接,背形褶曲轴面倾角为 $65^{\circ}\sim 90^{\circ}$ (图 2a,2b),倾向向形核部,背形褶曲幅度可达 17cm,略具顶厚特征,背形与向形均具底平的特征。在平面上,向形呈短轴状的向斜(图 2c),跨度约 35~45cm,向斜之间为背形褶皱,跨度约为 10cm,背形褶皱的轴迹呈蛇形弯曲,总体近 NWW—SEE 向,局部段呈 NNW—SSE、NW—SE 向,宽的向斜(似碗状)与窄的背形褶皱(似碗壁)毗邻,形成了圆形或椭圆形的凹陷与带状的隆起,三维形态如同一个个敞口的圆碗排列在一起,也如同盛放“鸡蛋的盒子”(图 2b)。变形之后被新的沉积物覆盖(在该层面上发现了类型丰富的、大量的、同方向的恐龙足迹)。

此类软沉积物变形构造是先期沉积的尚未固结、富含水的、近水平层状的、中—薄层状的互层粉砂质泥、砂,在受到 NNW—SSE、近 E—W 等多个方向的挤压应力作用,形成面状的、挤压干涉变形。不同方向近直立的褶曲轴面互相交叉,有的近垂直。

可能体现了地震波到达时面波的传播特征。

1.2 液化砂岩脉与液化角砾岩

诸城皇华镇黄龙沟恐龙足迹发掘点东北剖面上,液化砂岩脉较为发育,与其相伴,液化角砾岩发育较为普遍。在近水平的中、厚层状灰黄色砂岩中夹持厚约 2~4cm 的灰绿色泥质角砾岩层(图 3a~3d),泥岩角砾形态变化大,尖棱角状—棱角状,砾径约为 0.3~3.5cm,分选极差。泥质角砾多为原位,受液化砂脉分割(图 3b,图 4c),具有可拼性;也偶见角砾被液化砂脉卷携、迁移(图 3a)。液化角砾岩的形成,主要是在沉积后硬化的泥岩、页岩层,受液化的砂层触溶、侵位、撕裂而角砾化形成的(乔秀夫等,1994,2006;杜远生等,2000,2006;田洪水等,2006;Montenat et al.,2007;何碧竹等,2010)。角砾的出现没有表现出斜坡垮塌、剥蚀、断裂的特征,而显示出似连接、被液化、流化物质侵位的特征。研究区既存在单层的液化角砾岩(图 3a),也有网状的液化角砾岩(图 3d),主要取决于垂直液化砂岩脉发育,还是顺层液化砂岩脉发育,液化砂岩脉体的结构及成分特征与母源砂层基本一致。当厚层的砂沉积层与薄层的泥沉积层互层,震动发生时,垂直液化砂岩脉容易发育,剖面上可见液化砂岩脉长 1~3cm,宽 0.2~0.5cm,大多穿透泥岩层(图 3c)。而当砂沉积层与泥沉积层都为薄互层,震动发生时,顺层液化砂岩脉突破泥层后,易沿层侵位,网状分叉现象较普遍,分割了泥岩而成角砾,形成了软沉积变形下的液化角砾岩层(图 3b)。

1.3 卷曲变形与震积不整合

诸城皇华镇恐龙足迹化石点北路东的剖面下白垩统莱阳群杨庄组发育多层段的卷曲变形构造,部分形成了水塑性卷曲变形与震积不整合(图 4a,4b)。在深灰色泥质粉砂岩夹薄层细砂岩中可见水塑性变形,局部还见到液化作用的共同参与。该处的水塑性卷曲变形是由厚 2~5cm 的层状深灰色泥质砂层与 0.5~2cm 灰白色细砂互层构成的具塑性流动状的褶曲变形构造;其中局部岩性较粗的薄砂层受古地震作用部分发生液化,向上挤入泥岩或粉砂质泥岩中,形成小的液化脉(图 4b)。水塑性卷曲变形构造的顶部与上覆未变形层以突变接触,呈截切样式,形成了震积不整合(梁定益等,1991,1994;乔秀夫等,2008,2009;杨剑萍等,2008)。水塑性卷曲变形是在软沉积变形构造中,呈现了流变行为的卷曲变形构造。关于流变行为与构造作用强度,不同研究者有着不同的划分(Lowe,1975;Allen,

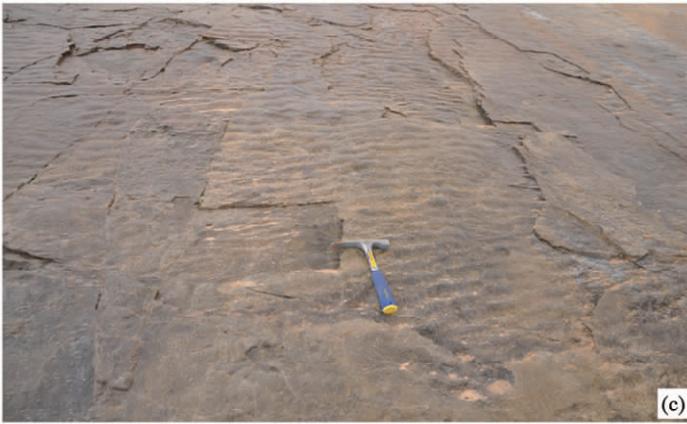
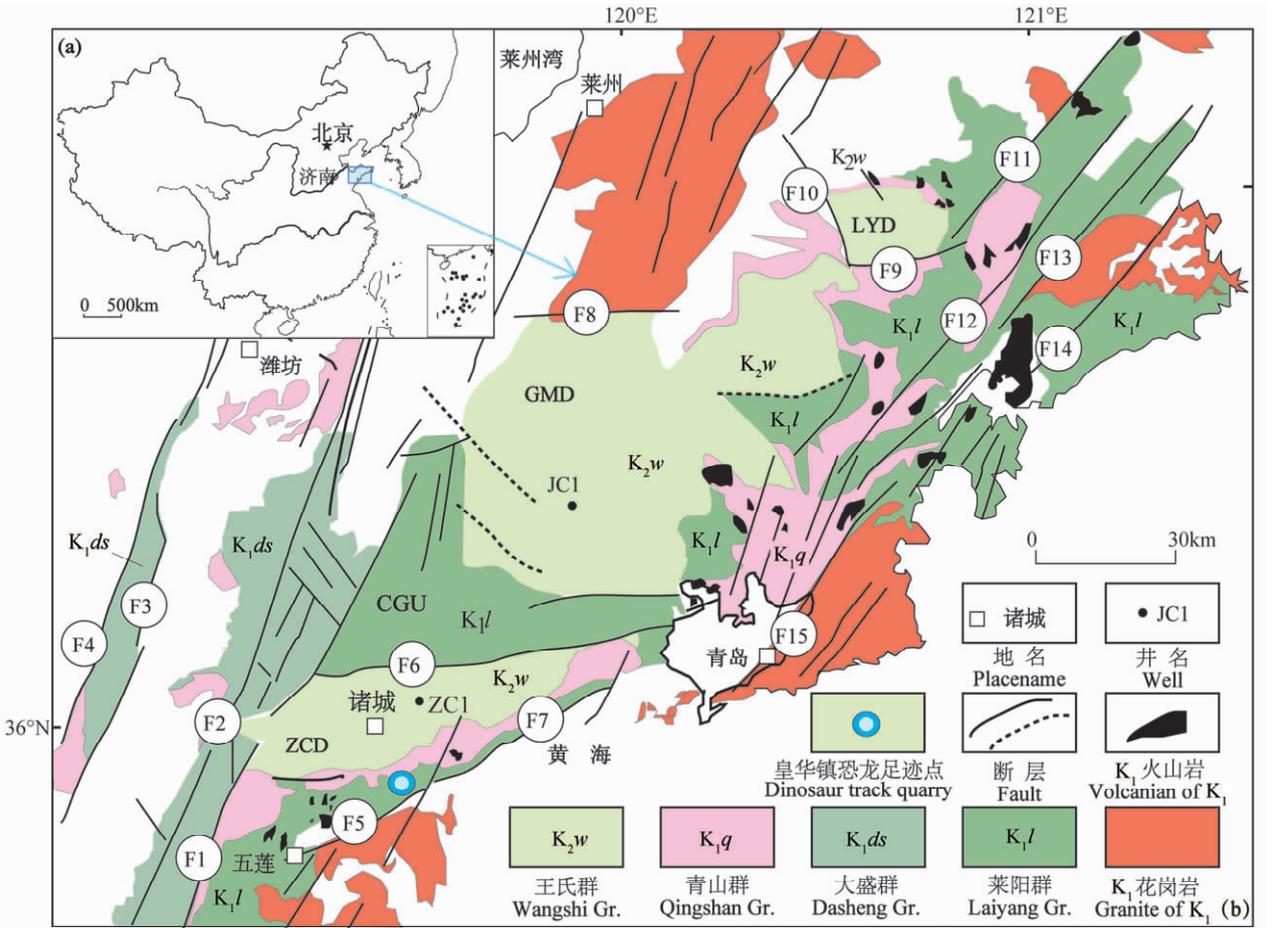


图 1 山东诸城市皇华镇早白垩世恐龙足迹特征

Fig. 1 Characters of dinosaur tracks in Laiyang Group of Early Cretaceous, Huanghua, Zhucheng, Shandong

(a)—研究区地理位置;(b)—山东胶莱盆地构造地质简图(据张岳桥等,2008 修改);(c)—诸城皇华镇大山村黄龙沟恐龙足迹点下白垩统莱阳群杨庄组多层波痕,镜头向南,地质锤长为 23cm,以下相同;(d)—不同类型近同向恐龙足迹,镜头向西;(e)—鸟脚类恐龙足迹,比例尺为 10cm;(f)—小型兽脚类恐龙足迹,硬币直径为 1.9cm;ZCD—诸城凹陷;GMD—高密凹陷;CGU—柴沟隆起;LYD—莱阳凹陷;F1—昌邑-大店断裂;F2—安邱-莒县断裂;F3—唐吾-葛沟断裂;F4—沂水-汤头断裂;F5—五莲断裂;F6—百尺河断裂;F7—胶县断裂;F8—平度断裂;F9—五龙河断裂;F10—茂支场断裂;F11—东陡山断裂;F12—郭城断裂;F13—朱吴断裂;F14—海阳断裂;F15—青岛断裂

(a)—Location of study area; (b)—sketch of structure and geology of Jiaolai basin, Shandong province, dot blue shows dinosaur track of excavate site in Huanghua, Zhucheng city (modified from Zhang Yueqiao et al. ,2008); (c)—ripple mark of outcrop and excavate, camera lens towards south, hammer is 23cm long, following the same; (d)—variety dinosaur tracks of Yangzhuang Formation in Laiyang Group, Lower Cretaceous, visible tracks in dense and towards the same direction, Dashan village of Huanghua, Zhucheng; (e)—orinthopod tracks, the scale is 10cm; (f)—small theropod tracks, the coin size is 1.9cm; ZCD—Zhucheng depression; GMD—Gaomi depression; CGU—Chaigou uplift; F1—Changyi-Dadian Fault; F2—Anqiu-Juxian Fault; F3—Tangwu-Gegou Fault; F4—Yishui-Tangtou Fault; F5—Wulian Fault; F6—Baichihe Fault; F7—Jiaoxian Fault; F8—Pingdu Fault; F9—Wulonghe Fault; F10—Maozhichang Fault; F11—East Doushan Fault; F12—Guocheng Fault; F13—Zhuwu Fault; F14—Haiyang Fault; F15—Qingdao Fault

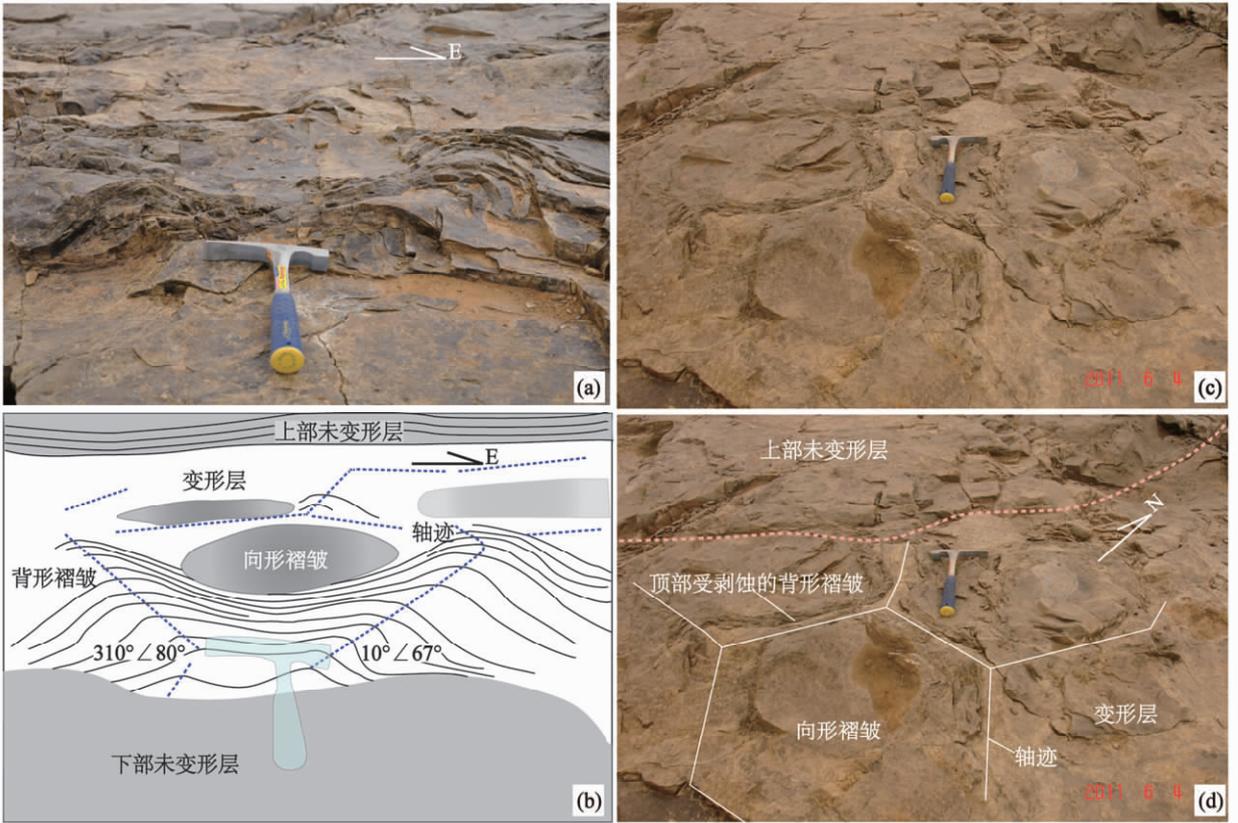


图 2 山东诸城皇华镇黄龙沟下白垩统莱阳群杨庄组波状褶皱变形构造

Fig. 2 Undulate fold deformation styles of Yangzhuang Formation in Laiyang Group on Lower Cretaceous, Huanghua, Zhucheng, Shandong

(a)—波状褶皱的剖面特征,皇华镇黄龙沟恐龙足迹化石点东北部,镜头向北;(b)—波状褶皱的剖面轮廓简图,变形的背形褶皱轴面倾向分别为 10°和 310°,倾角分别为 67°和 80°,上部、下部为层状未变形的薄-纹层状灰绿色粉砂岩、细砂岩与泥岩互层;(c)—波状褶皱的平面特征,向斜与背形毗邻,向形宽,背形窄,像“盛鸡蛋的盒子”;(d)—波状褶皱的平面特征解析,可见大小不一的短轴向斜由背形隔开,向斜与背形褶皱均为互层的泥岩、粉砂岩构成,部分背形褶皱的脊部被剥蚀,露出下伏薄层的脊部

(a)—Undulate folds, look like “egg-box”(or bowl) appearance, show synclines with diversity size connected with antiformal folds, siltstone and mudstone ineterbedded in Lower Cretaceous, at northeastern of Huanghua excavation, camera lens towards north; (b)—sketch of undulate folds deformation structural section, shows that trends are 10° and 310°, angles of dip are about 67° and 80°, underlying bedding and overlying bedding are un-deformation layers consist of gray green sandstone and gray mudstone; (c), (d)—planar characteristic of undulate fold deformation structure (diameter is 35~45cm and amplitude is about 5~17cm)

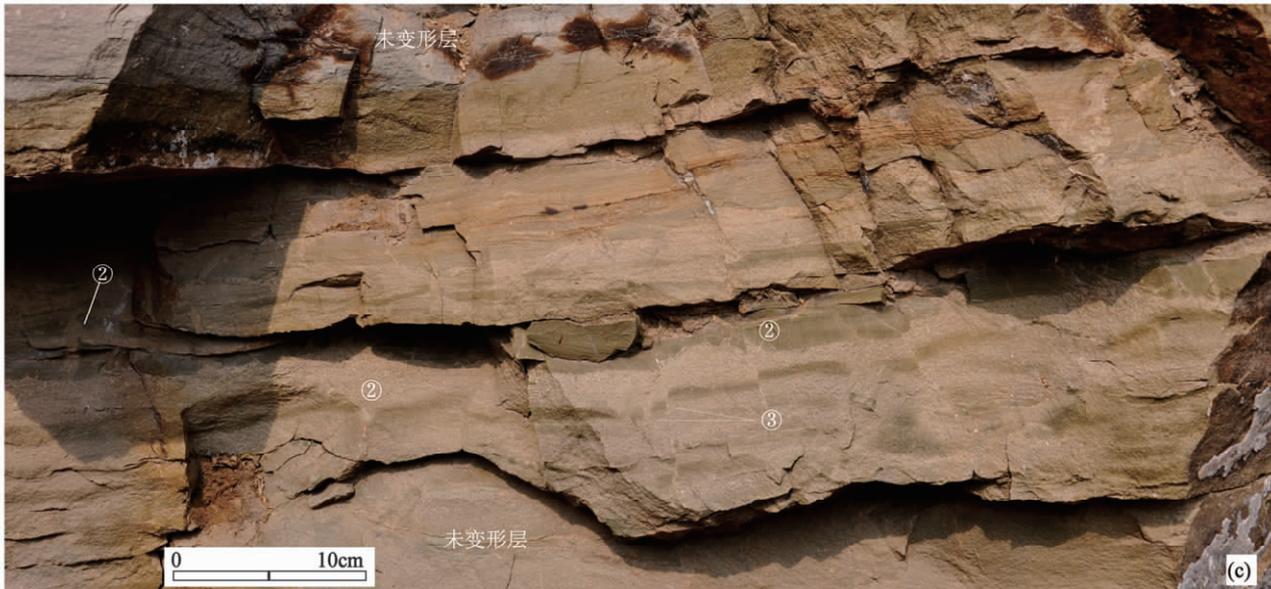
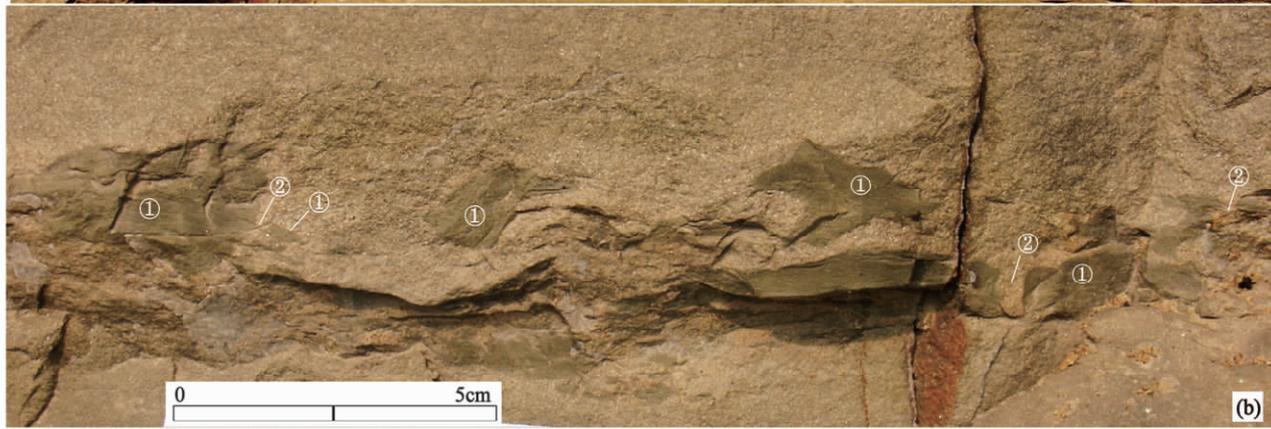
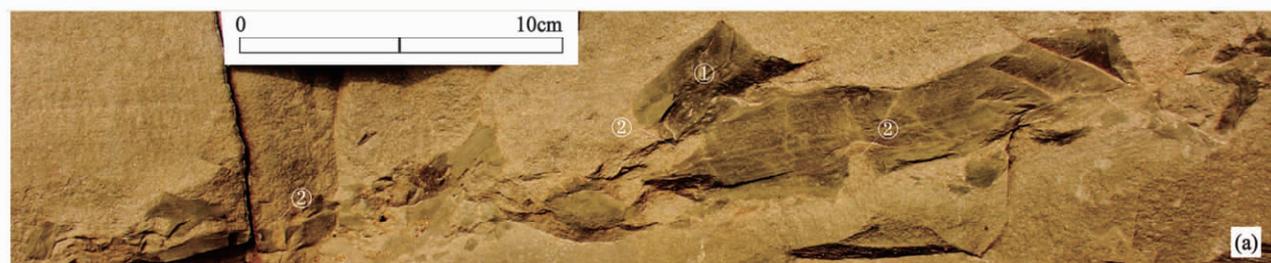


图 3 山东诸城皇华镇早白垩世莱阳群杨庄组液化砂岩脉及液化角砾岩

Fig. 3 Liquefied sand vein and breccias of Yangzhuang Fm. in Laiyang Group on Early Cretaceous, Huanghua, Zhucheng, Shandong
(a)—液化角砾,距诸城皇华镇黄龙沟恐龙足迹点北路东 880m,比例尺刻度为 10cm;(b)—液化角砾和垂直液化砂岩脉,剖面位置同图 3a;
(c)—垂直的液化砂脉及粒序断层,可见垂直的液化砂脉向上、向下侵入泥层;偶见液化砂岩脉与微地震断层有相关性,0.5~3cm 微断距的粒序断层密集发育,切割了薄互层的砂泥岩层,在粒序断层(Seilacher, 1969, 1984)顶部存在液化砂岩脉向上侵位;(d)—顺层的液化砂脉与液化角砾岩,顺层的浅灰色液化砂脉成网状,撕裂并卷裹着深灰色、灰绿色泥质角砾,诸城皇华镇大山村黄龙沟恐龙足迹点北东 0.68km;①—液化角砾岩;②—液化砂脉;③—粒序断层

(a), (b)—Liquefied breccia and vertical liquefied sand vein, 0.88km northeast of dinosaur tracks in Huanghua, Zhucheng, and camera lens is towards east, the scale is 10cm; (c)—vertical liquefied sand vein and graded faults, illustration the vertical liquefied sand vein invaded mud bedding, and the small graded faults (Seilacher, 1969, 1984) occurred concentratedly with small fault throw about 0.5~3cm, cut through laminated sand and mud bedding; (d)—liquefied breccia and bedding liquefied sand vein, shallow grey liquefied sand vein reticulated, tear the mud bedding, and carried over mud breccias, 0.68km northeast of dinosaur tracks in Huanghua, Zhucheng; ①—liquefied breccias; ②—liquefied sand vein; ③—graded fault

1977; Owen, 1987; 乔秀夫等, 2008), 水塑性、液化至流化作用的发生, 反映了地震强度的不断加大, 目前已经达成共识, 水塑性、液化、流化卷曲变形即可单独存在, 又可叠加赋存。图 4(a)既有水塑性卷曲变形特征, 又叠加了沿薄砂层的液化流动(图 4b)。

1.4 底劈

底劈变形构造在诸城皇华镇恐龙足迹化石点北路东剖面的下部(图 5), 底部未变形为相对厚层的细砂岩层, 该层也是当时底劈变形构造发生的主动层, 其上覆盖着水平层状的薄—纹层状的泥、粉砂质泥沉积层。当地震发生时, 底部的细粒沉积物受到液化, 向上覆未固结的沉积层侵入, 使得部分薄—纹层状沉积层被刺穿, 液化砂脉形成底劈的核部, 呈舌状。而由于液化砂脉向上的挤入, 造成侵入的顶部未固结沉积层向侧翼移动, 即形成顶部减薄, 翼部增厚的特征。由于活动强度的限制, 液化砂脉未完全刺穿上覆沉积层, 上覆沉积层随着下伏沉积层变形形态发生变化, 底劈发生之后, 受地貌的影响, 新沉积层形成了超覆沉积。在变形层内, 除了底部存在液化现象外, 变形层其他部分液化较少。

2 诸城地区早白垩世古地震序列

2.1 诸城地区早白垩世地层沉积序列

研究区位于郯庐断裂中段——沂沭断裂带、苏鲁造山带北缘五莲—荣成断裂带及胶莱盆地南部柴沟隆起南缘百尺河断裂所夹持的诸城断陷盆地。盆地主要发育白垩纪至新生代地层(宋明春等, 2002; 施炜等, 2003; 张岳桥等, 2006; 殷秀兰等, 2005; 柳永清等, 2010, 2011)。白垩纪地层主要由陆相碎屑岩、火山碎屑岩及火山岩构成, 自下而上依次划分为下白垩统莱阳群和青山群以及上白垩统王氏群。下白垩统莱阳群包括林寺山组、止风庄组、杨家庄组、曲

格组和法荃组, 以冲积扇—湖相—河流相沉积为主。下白垩统青山群包括后乔组、八亩地组、石前庄组和方戈庄组, 以火山岩及火山碎屑岩为主(图 6); 在沂沭断裂带内为大盛群沉积岩。上白垩统王氏群包括林家庄组、辛格庄组和红土崖组, 以洪、冲积扇相和泛滥平原相沉积为主。

下白垩统莱阳群在胶莱盆地南部分布广泛, 但从西到东岩性、岩相、厚度变化较大, 在皇华镇附近该莱阳群厚近 2000m, 是由山麓洪积相—河流相—湖相—河流相组成, 化石丰富(宋明春等, 2002)。林寺山组主要由紫灰色复成分砾岩和含砾长石粗砂岩组成, 厚约 150m, 是一套洪积扇沉积, 是盆地沉积演化的早期充填。止风庄组(水南组)是一套灰色、灰棕色含砾砂岩夹粉砂岩、灰黑色页岩组合, 厚约 400m, 为河流相—浅湖相—深湖相沉积序列, 夹有白色沉凝灰岩和泥灰岩透镜体。杨庄组厚约 1100m, 可划分为 3 个小旋回, 每个旋回由下向上为灰黄色细砂岩、粉砂岩与灰色、灰绿色页岩互层变为灰黄色含砾砂岩、细砂岩, 下部具有不对称波痕, 上部发育交错层理和斜层理, 在泥、页岩发育段化石更为丰富, 观察到的古地震记录及恐龙足迹化石主要赋存于杨庄组。曲格庄组厚约 390m, 主要由灰黄色杂砂岩、黄绿色粉砂质页岩, 向上过渡到紫灰色含砾粗砂岩, 砾石成分为火山岩、花岗岩、脉石英及紫红色长石石英砂岩等, 为盆地早白垩世莱阳群沉积晚期的一套含火山物质的河流相沉积。

胶莱盆地东部莱阳龙旺庄地区水南组(相当于本区杨庄组)中部粉砂岩和泥岩地层中夹持的薄层玄武质火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年给出的年龄平均值为 129.4 ± 2.3 Ma(张岳桥等, 2008)。早白垩世青山群为一套火山岩和火山碎屑岩夹沉积岩, 诸参 1 井钻遇厚度为 700 m(张岳桥等, 2008)。

火山岩岩性复杂,包括酸性到基性多种火山岩,主要有灰紫色火山集块岩、灰紫色流纹岩和灰绿色凝灰岩、玄武质安山岩、英安岩等,火山岩的年龄集中于120~105Ma,时代为早白垩世中晚期(邱检生等,2001)。根据胶莱盆地莱阳群火山岩、青山群火山岩以及沉积地层对比层序及年代学分析,观察到的古地震记录主要发生在杨庄组中下部沉积时期,莱阳杨庄组沉积期火山岩也存在于杨庄组中下部,即杨庄组中下部沉积时期古地震活动及火山活动均有发生,且地震活动频次远多于火山活动。

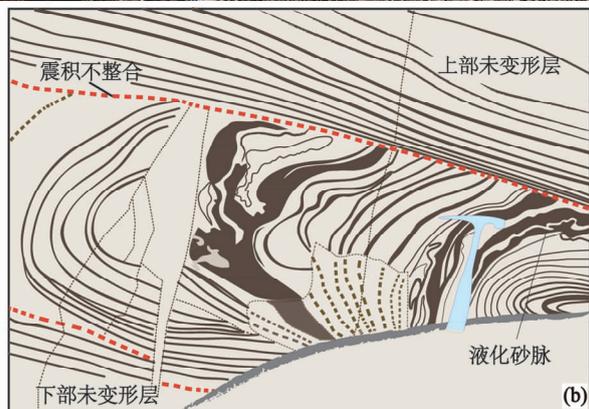


图4 山东诸城皇华镇早白垩世莱阳群杨庄组卷曲变形与震积不整合

Fig. 4 Convolution deformation and seismic unconformity of Yangzhuang Formation in Laiyang Gr. on Early Cretaceous, Huanghua, Zhucheng, Shandong

(a)一卷曲变形与震积不整合,变形层为薄层一纹层的粉砂岩、泥岩互层,已沉积未固结或半固结的砂、泥层受挤压作用,发生水塑性的卷曲变形,变形后顶部被截割,被上覆未变形岩层覆盖,形成震积不整合,该点距诸城皇华镇恐龙足迹化石点北东约0.70km;(b)一卷曲变形与震积不整合图4(a)的素描图,可见薄层的粉砂岩、粉砂质泥岩发生水塑性卷曲变形,呈倒伏的褶皱,局部呈现薄层的浅灰色砂液化向深灰色泥岩中侵位的现象;(c)一多个未变形层与变形层互层剖面,可见卷曲变形、丘槽变形、液化角砾岩等变形构造,照片中地质学家身高180cm

(a)—Convolution deformation and seismic unconformity, laminated sand and mud sediment during not consolidated and unlithified occurred hydroplastic fold induced by compress stress, and then covered by un-deformation beddings, this spot at 0.7km northwest dinosaur track quarry; (b)—sketch of convolution and seismic unconformity, hydroplastic fold presents recumbently folded (overturned), and partly presented liquefied sand vein; (c)—multiple deformation layers and undeformation layers interbedded, convolution deformation, dome-trough deformation and liquefied breccias have been seen in deformation layers, the geologist is 180cm high in photo

2.2 诸城地区早白垩世古地震序列

在诸城皇华镇大山村黄龙沟恐龙足迹发掘点所观察到古地震记录,处于恐龙足迹层的下部,主要表现为两套(图6),中间为未变形层分隔,下部为灰色细砂岩负载构造,变形层厚30~45cm,未变形层厚1.2m;上部变形层为波状褶皱,变形层厚约20cm,上部未变形层厚26cm,面上为多种恐龙足迹层,具有波痕。即在厚2.0m的沉积地层中,见到2期古地震记录。

在距诸城皇华镇黄龙沟北东0.70km的剖面上,观察到的软沉积变形构造处于恐龙足迹层的上部,在厚8m的地层中存在4套软沉积变形构造(图6),变形层厚度为约20~60cm,未变形层厚80~150cm。由下向上为卷曲变形褶皱和震积不整合(图4a)、底劈构造(图5,变形层③)、液化角砾岩(图4c,变形层②)、低幅度丘-槽变形构造和液化角砾岩(图4c,变形层①)。

在距诸城皇华镇黄龙沟北0.88km的剖面上,在厚3m的地层中存在2套软沉积变形构造(图6),下部变形层厚度约为3~20cm,发育粒序断层、液化砂岩脉,未变形层厚40~120cm;上部变形层厚2~8cm,发育液化砂岩脉与液化角砾,此变形层是观察到厚度最薄的古地震记录。



图 5 山东诸城皇华镇早白垩世莱阳群杨庄组的底劈构造

Fig. 5 Diapir of Yangzhuang Formation in Laiyang Gr. on Early Cretaceous, Huanghua, Zhucheng, Shandong

- ①—液化的细粒沉积物向上覆地层侵入,形成底劈核部,呈舌状;②—侵入的液化砂脉造成顶部减薄;
③—侵入的液化砂脉造成翼部增厚;④—底劈形成后的超覆沉积

①—Plastic intrusion of liquefied fine grained sediment broke up several laminated dark silty marls bedding, and closing upwards, central of diapir formed, shown like tongue; ②—top bedding changed to thinning by intrusion sand dykes; ③—limb bedding thickened; ④—on lap deposited after diapir deformation

在观察的 3 个剖面累计厚度为 13m 的地层中,发现古地震记录至少为 8 次,仅在早白垩世莱阳群杨庄组中段沉积时期,古地震活动既有阶段性,又有频发性。

3 讨论

3.1 软沉积变形构造的诱发机制初步分析

诸城断陷是受 3 组断裂围限而形成的一个面积约 900km² 的三角形断陷(图 1b),其西缘为北北东向的郯庐断裂中段,南缘为北东东向五莲反转断层,北缘为近东西走向的百尺河南倾正断裂。诸城断陷所属的胶莱盆地在白垩纪—古新世之间,经历了伸展—挤压—走滑应力体制的交替演化。早白垩世早期经历了 NW—SE 向伸展和晚期近 W—E 向伸展;早白垩世末期至晚白垩世初期,盆地遭受 NW—SE 向挤压(张岳桥等,2008)及郯庐断裂带的左旋走滑活动作用影响(许志琴,1984;陆克政等,1994)。晚白垩世—古新世时期,构造应力场转变为 S—N 向

伸展,以及郯庐断裂带 NNE 向的右旋走滑活动及其拉分作用;至古新世末期转换为 NE—SW 向挤压(张岳桥等,2008)。

在区域构造作用下,胶莱盆地早白垩世莱阳群沉降中心的走向为 NEE—SWW,与五莲断裂平行,而与 NNE 走向的郯庐断裂带斜交。诸城皇华镇早白垩世莱阳群古地震记录研究表明,在早白垩世莱阳群杨庄组沉积中期,古地震记录以单向挤压缩短的丘槽构造以及多向挤压形成的波状褶皱为主,呈现出挤压构造作用,且由下向上,由水塑性卷曲变形变为液化底劈构造,向上发育到液化砂脉、液化角砾岩。根据水塑性、液化、流化作用反映的地震活动强度研究表明(Lowe, 1975; Allen, 1977; Owen, 1987; 乔秀夫等,2008),杨庄组沉积后期发生的地震强度大于早期,进一步明确了构造作用时限及效应。从观察到的古地震记录向北表现有减少特征,推测此时期发震断裂可能是诸城断陷南缘的五莲断裂。张岳桥等(2008)通过断层运动学分析和断面滑动矢

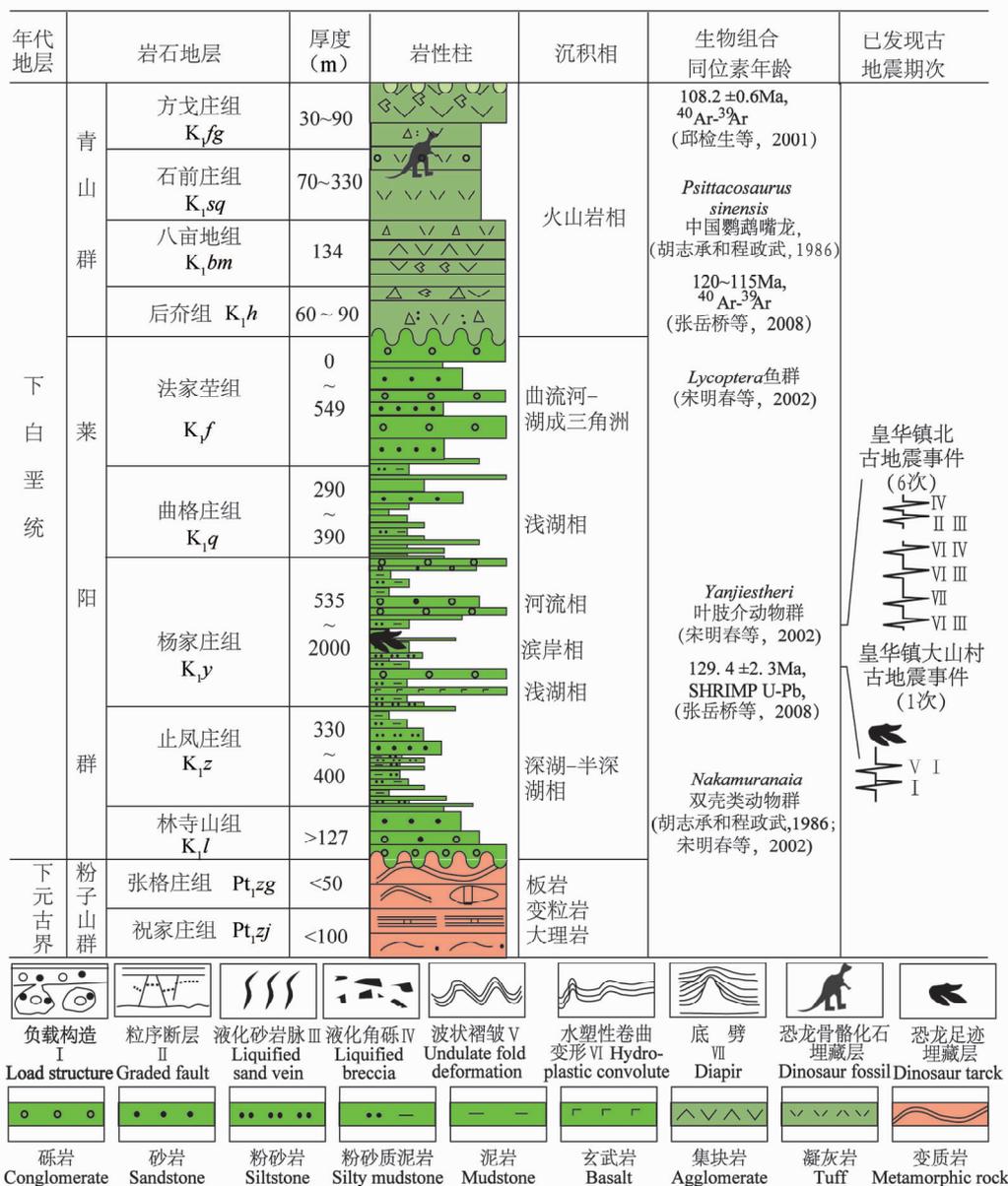


图 6 山东诸城地区早白垩世地层综合柱状图与古地震序列(据宋明春等,2002;张岳桥等,2008;柳永清等,2010)

Fig. 6 Simplified stratigraphic chart and paleo-seismits sequence in Laiyang Group of Early Cretaceous, Huanghua, Zhucheng, Shandong (modified from Song Mingchun et al. , 2002; Zhang Yueqiao et al. ,2008; Liu Yongqing et al. , 2010)

量的测量和反演,认为盆地早白垩世早期为 NW—SE 向伸展,晚期为 W—E 向伸展。本次观察发现的古地震记录,反映了介于两期伸展之间存在有近东西向的挤压作用,在杨庄组沉积中期开始出现多期次的地震活动,并形成了挤压构造作用下的变形构造。

3.2 诸城早白垩世古地震事件与恐龙足迹化石

诸城皇华镇早白垩世莱阳群杨庄组沉积时期,古地震活动形成的软沉积物变形构造,主要以多种卷曲变形构造和液化角砾岩为主,与诸城库沟—龙

骨涧晚白垩世王氏群古地震记录(何碧竹等,2011)以负载构造、液化砂岩或砂砾岩脉以及混插沉积构造为主的特征明显不同。形成不同类型古地震记录的差异,主要源于早白垩世莱阳群杨庄组湖相沉积的细砂岩、粉砂岩及泥、页岩互层,地层能干性小,且能干性差异也小,更容易形成卷曲变形和褶皱。而晚白垩世王氏群为冲积扇和洪泛平原上沉积的砂、砾岩,沉积物的密度差异越大,则更容易形成负载构造,即在震动时,重力分异作用更易起到主导作用。因此,控制地震活动作用时形成的软沉积物变形构

造类型的关键因素是岩性、岩相、沉积环境。

诸城皇华镇早白垩世莱阳群沉积时的古地震记录具有阶段性、频发性,同时杨庄组沉积中段存在挤压的构造环境,且表现为近W—E向的挤压作用为主,与区域应力场匹配(张岳桥等,2008),结合莱阳群杨庄组、曲格庄组沉积地层发育,表明胶莱盆地早白垩世莱阳群早期为陆内拉张环境,在早白垩世莱阳群杨庄组沉积中期为弱挤压的构造环境,古环境已开始发生变化,湖相沉积环境逐渐过渡到河流相沉积,湖相沉积区应向皇华镇北西方向迁移。诸城皇华镇早白垩世莱阳群恐龙足迹(Li Rihui et al., 2011)中占多数的鸭嘴龙,喜于生活在湖泊沼泽环境,以岸边的植物和水中的蚌类、水藻为食(赵喜进等,2007;李志恒,2010)。构造作用及频发的地震突发事件,会造成生存环境的转换,动物求生的本能会使恐龙向水草丰茂的环境迁徙,从而可能形成了在古地震发生之后不久的、丰富的恐龙足迹。在古地震记录之上沉积层中保留的恐龙足迹既有同向性,又不十分杂乱,应是迁徙过程中留下的遗迹,恰与这种构造突发事件及环境的变迁相吻合。

4 结论

(1)在诸城皇华镇黄龙沟恐龙足迹化石埋藏层中,发现了下白垩统莱阳群杨庄组多套古地震记录,包括波状褶皱、底劈构造、液化砂岩脉、液化角砾岩、粒序断层、卷曲变形和震积不整合等塑性、脆性软沉积物变形构造,以卷曲变形构造为主。

(2)对比发现初始沉积物、沉积相及构造作用,确定了可能形成的软沉积物变形构造类型。

(3)早白垩世莱阳群沉积中期,地震活动具有阶段性及频发性,且以单向挤压的丘-槽构造及双向挤压的波状变形为主,且后期有构造活动强度加大的特征。推测此时期发震断裂可能是断陷的南缘断裂——五莲断裂,提出恐龙足迹化石的出现可能是由于震后及环境的转换而导致成群恐龙迁徙留下的足迹。

(4)研究区古地震记录的研究,初步建立了该时期古地震事件与沉积构造演化的联系,约束了构造作用的属性及时限,为构造沉积环境的转换提供了证据。这种研究思路和方法,可为系统地解剖胶莱盆地及邻区断裂的活动历史,确定盆地构造-沉积演化历史,确定地质历史时期的灾变突发事件与生物活动的关系,提供丰富的证据,此项研究有待进一步系统化。

致谢: 本研究得到许志琴院士的大力支持,得到李海兵研究员、柳永清研究员、张泽明研究员、张增奇

研究员、旷红伟研究员、山东诸城旅游局陈树清主任以及张森工程师的帮助,在此表示衷心的感谢。感谢吕洪波教授及审稿人对本文提出的建设性意见。

注 释

① 王金光,王立法,李庆平,张富中,秦杰,侯建华. 2004. 中华人民共和国区域地质调查报告潍坊市幅(1:250 000).

参 考 文 献

- 杜远生,韩欣. 2000. 论震积作用和震积岩. 地球科学进展,(4): 389~394.
- 何碧竹,乔秀夫,许志琴,焦存礼,蔡志慧,张英利,苏德辰. 2010. 塔里木盆地满加尔拗陷及周缘晚奥陶世古地震记录及其地质意义. 地质学报,84(12):1805~1816.
- 何碧竹,乔秀夫,田洪水,陈树清,张艳侠. 2011. 山东诸城晚白垩世古地震事件与恐龙骨骼化石埋藏. 古地理学报,(6):1671~1505.
- 胡承志. 1973. 山东诸城巨型鸭嘴龙化石. 地质学报,2:179~206.
- 胡志承,程政武. 1986. 巨型山东龙再研究的新进展. 中国地质科学院院报,14:163~170.
- 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(4):605~610.
- 李日辉,刘明渭,松川正树. 2002. 山东发现侏罗纪恐龙足迹化石. 地质通报,21(8-9):596~597.
- 李志恒. 2010. 探访山东诸城“恐龙墓地”. 化石,1:2~8.
- 梁定益,聂泽同,宋志敏. 1994. 再论震积岩及震积不整合——以川西、滇西地区为例. 地球科学,19(6):845~850.
- 梁定益,聂泽同,万晓樵,陈国民. 1991. 试论震积岩及震积不整合——以川西、滇西地区为例. 现代地质,5(2):138~147.
- 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.
- 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. 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. 东营:石油大学出版社,1~174.
- 乔秀夫,李海兵,王思恩,郭宪璞,司家亮,宗文明. 2008. 新疆境内塔拉斯-费尔干纳断裂早侏罗世走滑的古地震证据. 地质学报,82(6):721~730.
- 乔秀夫,李海兵. 2009. 沉积物的地震、古地震效应. 古地理学报,11(6):593~610.
- 乔秀夫,宋天锐,高林志,李海兵,彭阳,张传恒,章雨旭. 2006. 地层中地震记录(古地震). 北京:地质出版社,1~263.
- 乔秀夫,宋天锐,高林志,彭阳,李海兵,高励,宋彪,张巧大. 1994. 碳酸盐岩振动液化地震序列. 地质学报,68(1):16~34.
- 邱检生,王德滋,罗清华,刘洪. 2001. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar定年——以五莲分岭火山机构为例. 高校地质学报,7(3):351~355.
- 山东省第四地质矿产勘查院. 2003. 山东省区域地质志. 济南:山东省地图出版社,1~970.
- 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——以王氏群和大盛群变形分析为例. 地质通报,22(5):325~334.
- 宋明春,李远友,战金成,梁帮启. 2002. 1:25万日照市幅区域地质调查报告. 山东省地质调查院,1~660.
- 田洪水,张增奇. 2006. 山东安丘地区郯庐断裂带古近纪冲积物震

积岩序列. 地质科学, 41(2):208~21.

邢立达, 杰瑞德 D 哈里斯, 王克柏, 李日辉. 2010. 山东诸城盆地下白垩统莱阳群的非鸟恐龙与鸟足迹化石组合. 地质通报, 29(8): 1105~1112.

许志琴. 1984. 郯庐裂谷系概述. 构造地质论丛(3). 北京: 地质出版社, 39~46.

杨剑萍, 聂玲玲, 张琳璞, 杨君, 张跃. 2008. 柴达木盆地西南缘乌南油田新近系古地震记录及储集性能研究. 地质学报, 86(6):805~812.

杨钟健. 1958. 中国古生物志(142册), 新丙种(16号). 北京: 科学出版社, 1~138.

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. 地质论评, 51(5):502~506.

张岳桥, 李金良, 柳宗泉, 任凤楼, 袁嘉音. 2006. 胶莱盆地深部拆离系统及其区域构造意义. 石油与天然气地质, 27(4):504~511.

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.

赵喜进, 李敦景, 韩岗, 赵华锡, 刘风光, 李来进, 方晓思. 2007. 山东的巨大诸城龙. 地球学报, 28(2):111~122.

Allen J R L. 1977. The possible mechanics of convolute lamination in graded sand beds. J. Geol. Soc. London, 134:19~31.

Li Rihui, Lockley M G, Matsukawa Masaki, Wang Kebai, Liu Mingwei. 2011. An unusual theropod track assemblage from the Cretaceous of the Zhucheng area, Shandong Province, China. Cretaceous Research, 32: 422~432. doi: 10.1016/j.cretres. 2010.10.006.

Lowe D R. 1975. Water escape structures in coarse-grained sediments. Sedimentology, 22: 157~204.

Montenat C, Barrier P, d Stevov P O, Hibsich C. 2007. Seismites: an attempt at critical analysis and classification. Sedimentary Geology, 196: 5~30.

Owen G. 1987. Deformation Processes in Unconsolidated Sands. In: Jones M E, Preston R F (eds). Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks. London: Geological Society of London Special Publication, 29: 11~24.

Seilacher A. 1969. Fault-grade beds interpreted as seismites. Sedimentology, 13: 155~159.

Seilacher A. 1984. Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events. Marine Geology, 55: 1~12.

Paleoearthquake Events of Early Cretaceous Laiyang Stage and Dinosaur Migration in Zhucheng, Shandong Province, Eastern China

HE Bizhu¹⁾, QIAO Xiufu¹⁾, TIAN Hongshui²⁾, ZHANG Yanxia³⁾

1) State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institutes of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037; 2) Shandong Jianzhu University, Jinan, 250014; 3) Dinosaur Research Center, Zhucheng, Shandong, 262200

Abstract

Unusual, abundant dinosaur tracks have been discovered in Huanglonggou of Huanghua County in Jiaodong peninsula, eastern China. The tracks were found to occur in the Yangzhuang Formation of Early Cretaceous Laiyang Group in south of Zhucheng faulted depression in Jiaolai basin. In this study, several sets of paleo-earthquake records were found in the Yangzhuang Formation immediately in underlying and overlying track-bearing strata. Soft-sediment deformation structures include undulate fold, diapir, liquefied sand vein, liquefied breccias, convolute deformation and seismites unconformity, and graded faults. Our analysis shows that initial sediments, sedimentary facies and tectonism determined structural deformation styles of soft sediments produced by seismic activities. During interim of sedimentation of early Cretaceous Laiyang Group, earthquakes were characterized by multiple periods and frequent occurrences, with unilateral compressional dome-trough structure and bi-directional compressional wavy deformation being predominant, and by increasing tectonic activities at late stage. Based on the identified paleo-earthquake development records and their magnitude analysis, it can be assumed that seismogenic fault was likely the Wulan fault, the southern segment of faulting in this period. Regional tectonic effect caused the change of sedimentary environments gradually from lacustrine to fluvial facies, and after outbreak of paleo-earthquakes, abundant tracks of dinosaur migration were left and preserved on lacustrine area. Paleo-seismic records can help built the link between paleo-earthquake events and deposition environment and tectonic evolution, and constrain attributes, frequencies and time-limit of tectonism, thus providing the evidence for determination of basin, surrounding structure and sedimentary development

Key words: Soft-sediment deformation structure; triggering of paleo-seism; dinosaur tracks; Early Cretaceous; Zhucheng, Shandong