

鄂尔多斯盆地早中侏罗世延安组软沉积物变形及成因分析

冷丹凤¹, 田 坤², 王彩霞¹, 师学耀¹

1. 延长油田股份有限公司 勘探开发技术研究中心, 陕西 延安 716000;
2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710069

摘 要: 古地震相关的软沉积物变形构造在盆地演化中具有指示盆地及其周缘构造活动的作用. 在鄂尔多斯盆地延安组岩心描述和野外调查过程中, 于定边西南部 DT3522 井、安塞延河剖面中, 发现并识别出软沉积物液化变形层, 包括液化作用相关的枕状层、液化砂岩脉、液化角砾岩、泥火山, 以及负载构造、球枕构造等 9 种变形构造. 通过软沉积物变形层位对比, 变形特征研究, 结合区域构造背景认为, 鄂尔多斯盆地延安组延 7 油层组沉积末期, 发生了 3 期古地震活动, 且呈现地震强度先弱后强的特征.

关键词: 鄂尔多斯盆地; 早中侏罗世; 延安组; 软沉积物变形; 古地震; 陕西省

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.05.007

SOFT SEDIMENT DEFORMATION AND GENESIS OF THE EARLY-MIDDLE JURASSIC YANAN FORMATION, ORDOS BASIN

LENG Dan-feng¹, TIAN Kun², WANG Cai-xia¹, SHI Xue-yao¹

1. Exploration and Development Technology Research Center, Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an 716000, Shaanxi Province, China;
2. Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710069, China

Abstract: The paleoearthquake-related soft sediment deformation structure plays a role in revealing the tectonic activity of basin and periphery in basin evolution. Based on the core description and field survey of Yanan Formation in Ordos Basin, the soft sediment liquefaction deformation layers are identified in DT3522 well in the southwest of Dingbian and the Yanhe section in Ansai, including the liquefaction-related pillow beds, liquefied sandstone vein, liquefied breccia, mud volcano and 9 deformation structures such as load structure and ball-and-pillow structure. Through study on the correlation between soft sediment deformation layers and deformation characteristics, combined with regional tectonic setting, it is believed that there are 3 stages of paleoseismic activities with the earthquake from weak to intense in the late sedimentary period of Y7 oil layer in Yanan Formation, Ordos Basin.

Key words: Ordos Basin; Early-Middle Jurassic; Yanan Formation; soft sediment deformation; paleoearthquake; Shaanxi Province

0 引言

软沉积物变形构造是近年来的研究热点, 特别是陆相含油气盆地中的同生变形构造, 在分析古沉积环境、古地理和古构造方面都具有重要的意义^[1]. 软沉

积物变形构造的类型多样, 变形过程复杂, 成因机制多解. 在软沉积物变形构造成因机制研究方面, 国内外学者从野外观察^[2-6]、岩心描述^[7-12]入手, 结合振动实验模拟^[13-16], 认为软沉积物变形与冰融作用、重力作用

收稿日期: 2020-03-17; 修回日期: 2020-05-18. 编辑: 黄欣、张哲.

作者简介: 冷丹凤(1984—), 女, 硕士, 工程师, 从事鄂尔多斯盆地中生界沉积地质研究, 通信地址 陕西省延安市宝塔区李渠镇延长油田股份有限公司, E-mail//272506867@qq.com

(滑坡、滑塌、泥石流)、液化作用、天然气水合物泄露、地震活动等因素有关^[6]。地震成因的软沉积物变形包括同生软沉积物变形和准同生软沉积物变形:同生的软沉积物变形以地裂缝、微褶皱、同沉积断层(包括阶梯状断裂)^[17]、震碎角砾岩等构造为特征;准同生变形以负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造、枕状层、变形层理、沙火山、液化脉、液化角砾岩等^[6,18]为特征。

鄂尔多斯盆地延长组岩心中识别出多种软沉积物变形构造,包括砂枕构造、球枕构造、微断层递变层、微裂缝、液化卷曲变形等,其成因为单一的古地震液化成因^[7,19-20]。延安组的软沉积物变形报道较少^[2,21],未能结合野外剖面 and 钻井岩心进行系统性研究,且对软沉积物变形的描述缺乏针对性。笔者以安塞区气象站旁的延河剖面、定边地区钻井岩心观察为依据,辅以前人对延安西杏子河裴庄露头的研究成果,描述安塞延河露头延安组枕状层、球枕构造、斜卧微褶皱、液化变形等软沉积物变形构造特征,探讨软沉积物变形的地震成因机制与意义,为研究鄂尔多斯盆地延安组的古地震活动,预测该时期三角洲-湖泊沉积体系中砂体展布提供新的资料与证据。

1 地质背景

延安组安塞延河剖面位于鄂尔多斯盆地中部,为一套西倾的单斜构造地层,区域未见断裂。安塞延河剖面近南北走向,延伸约 100 m,沿延河向南和向北均因上部河道冲刷、沉积物或河边建筑废弃物覆盖的影响,无法追踪。变形层位沉积厚度受后期冲刷的影响变化较大,由南部的 3.5 m (图 1①)变为北部的 0.5 m

左右(图 1②③)。根据地层对比,安塞延河剖面控制了延安组延 7 油层组上部地层^[2],代表三角洲前缘沉积环境^[22]下的厚层灰黑色泥岩夹灰色泥质粉砂岩、灰色细砂岩沉积(图 2、3)。DT3352 井处于定边油田西南部,为三角洲平原沉积(图 2),该井在延 7 油层组 1898.50~1904.80 m 取心 6.30 m,沉积序列表现为砂泥互层沉积。

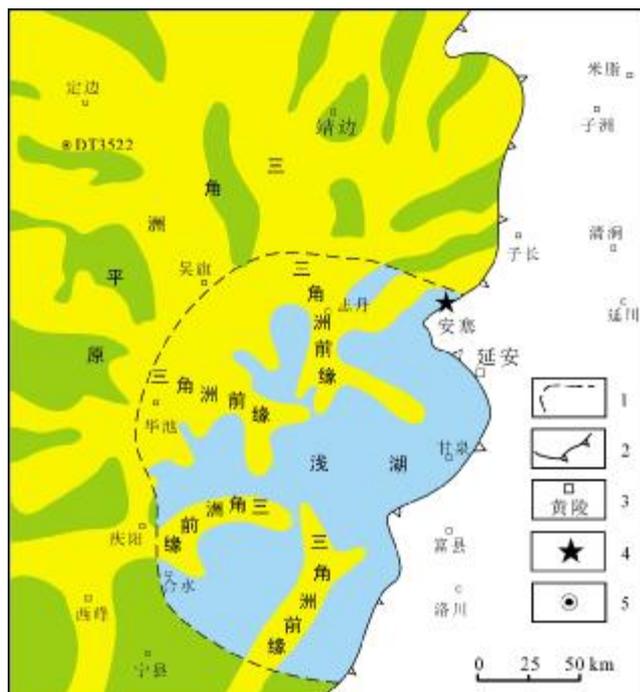


图 2 中侏罗统延安组延 7 油层组沉积相平面图

Fig. 2 Sedimentary facies of Y7 oil layer in Middle Jurassic Yanan Formation

1—湖岸线 (lake shoreline); 2—剥蚀线 (erosion line); 3—地名 (place name); 4—剖面位置 (section position); 5—钻井位置 (borehole position)



图 1 安塞延河延安组露头观测位置

Fig. 1 Outcrop of Yanan Formation by Yanhe River in Ansei area

1—地层界线 (stratigraphic boundary); 2—剖面观测点 (section position)

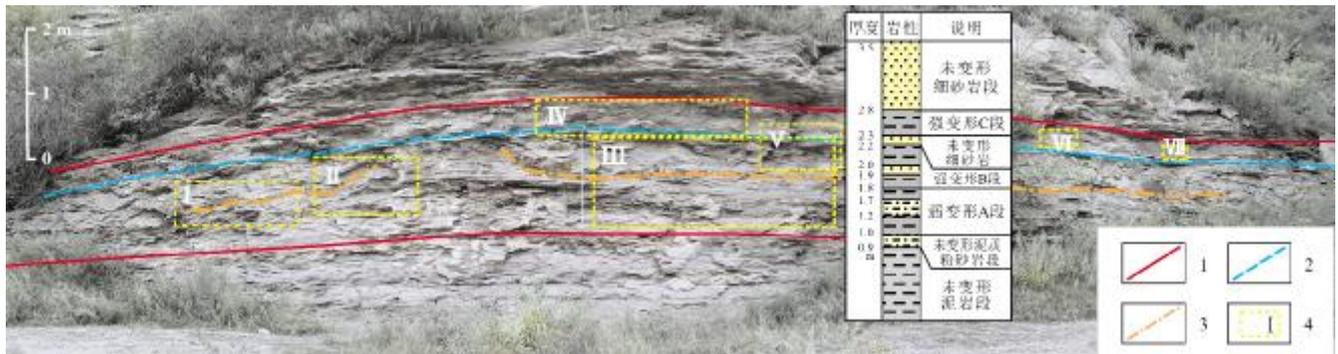


图3 安塞延河剖面软沉积物变形层位示意及岩性序列

Fig. 3 Soft sediment deformation layers and lithological sequence of Yanhe section in Ansai area

1—软沉积物变形层位上、下地层界线(top and bottom boundary of soft sediment deformation horizon); 2—软沉积物变形层位内部的薄层未变形细砂岩段(undeformed fine sandstone thin layer in soft sediment deformation horizon); 3—枕状构造层底界(bottom of pillow structure layer); 4—软沉积变形构造位置(location of soft sediment deformation structure)

2 软沉积物变形构造特征

2.1 枕状构造、液化角砾岩、液化砂脉及液化纹层

枕状构造是下伏砂层强烈液化, 向上覆软沉积砂层流动、穿刺, 在原地固定位置所形成的一组呈“凹”形弯曲的变形沉积体^[23], 枕状体的底面基本平行于原始层面, 砂枕边缘向上弯曲, 形成碟状或肾状。

安塞延河剖面枕状构造的枕状砂层底面略有起伏, 但总体平行于原始沉积层面, 仅在局部受液化作用的影响而产生明显倾斜(图3)。单个枕状砂体的边缘向上弯曲或断开, 说明在液化作用的影响下, 存在塑性变形和脆性错断(图4b)。枕状砂体的轴面多呈垂直层面的特征, 但也有呈近水平的、大致平行层面的特征(图4a、b), 说明液化作用发生时, 强液化层垂向流动, 穿过上覆弱液化层后, 局部还存在横向流动, 拖曳弱液化层, 形成近水平的枕状构造轴面(图4a); 同时还形成近垂直和倾斜的液化纹层; 剖分液化纹层有错断的现象(图4a)。

另外, 安塞延河剖面可见到液化角砾岩。角砾为细砂岩, 在枕状砂层上部 and 下部均有发育。细砂岩角砾的内部可见纹层褶皱变形, 且褶皱的轴面无固定方向(图4c)。DT3522井中, 可见砂岩液化向上刺入泥质沉积物中, 形成液化砂岩脉(图5)。

2.2 泥火山、液化均一层

安塞延河剖面在弱变形A段和强变形B段均可见到泥火山现象, 且强变形B段的泥火山规模明显大于弱变形A段。弱变形A段中可以见到特征的液化均

一层, 其上与液化角砾岩段突变接触。从枕状砂体的内部纹层可以看出(图6), 泥火山的形成过程与枕状构造形成过程相似, 只是下伏层位液化作用较强, 穿透上覆弱液化砂岩层, 且形成了液化均一层(图4d)。当液化作用强烈, 强液化层在垂向流动过程中, 可能形成上倾的枕状砂体(图3 I、II, 图6); 若液化均一层被后期的沉积冲刷剥蚀, 则仅可观察到后期沉积的与枕状砂层呈削截接触的沉积砂层(图6 II)。

2.3 负载构造、球枕构造

球枕构造在形成机制上不同于枕状构造。枕状构造为下伏强液化层上涌、底辟、穿刺形成的一系列基本平行于原始沉积层面的相间枕状体; 而球枕构造为重力作用下负载体脱离上覆砂岩层, 沉落入下伏岩性较细的地层内所致, 其形态以球枕为主, 分布高低不一。安塞延河剖面中负载构造和球枕构造往往是共生的, 当负载体完全脱离母岩砂层, 下沉落入至下伏较细的液化粉砂层内部甚至底部即成球枕构造。安塞延河剖面的负载构造和球枕构造在强变形B段和强变形C段均发育, 但强变形C段发育程度明显较强变形B段高(图3)。强变形B段仅在紧邻未变形细砂岩之下发育负载构造, 未下陷入下伏的细粒泥质沉积物中(图7 V); 而在强变形C段, 负载构造和球枕构造均发育, 负载构造发育在顶部未变形细砂岩段之下, 球枕构造在强变形C段中极其发育, 多已沉陷至下伏泥质沉积物底部。球枕构造中单个球枕砂体高10~17 cm, 宽则多在18 cm左右; 剖面中可见由单个球枕砂体形成的

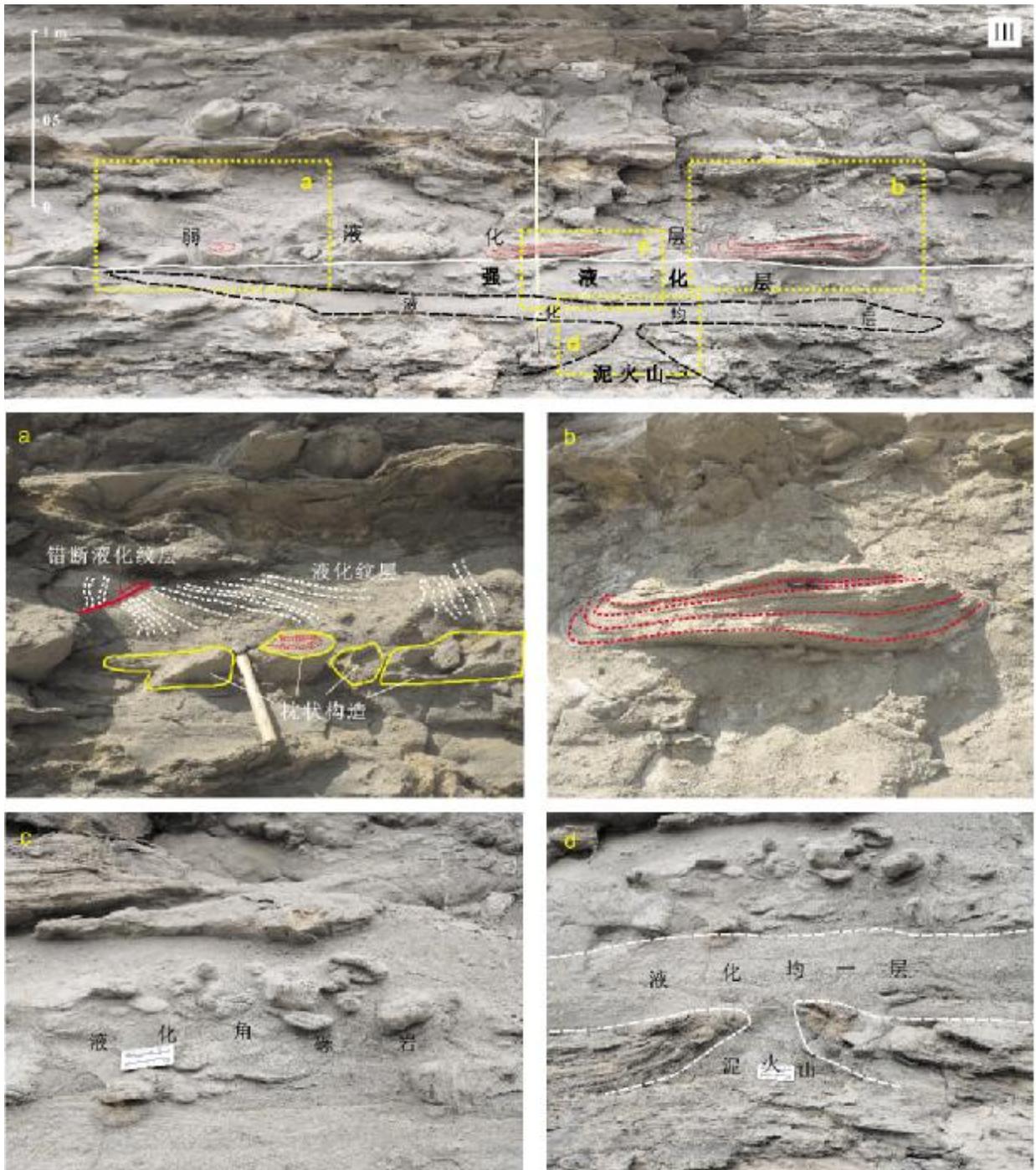


图 4 安塞延河剖面枕状构造及泥火山构造

Fig. 4 Pillow structure and mud-volcano structure in Yanhe section

III—图 3 III 位置放大(enlargement of inset III in Fig. 3)

球枕构造, 也可见由 2 个或 3 个球枕砂体共同形成的球枕构造(图 7).

2.4 微型斜卧褶皱

安塞延河剖面微型斜卧褶皱位于强变形 C 段的底部, 未变形细砂岩之上, 长约 20 cm, 高约 8.5 cm, 褶

皱层较薄, 厚 2.5~3.5 cm. 隐约可见由 2 个轴面大致平行的次级褶曲组成(图 8).

3 成因机制分析

软沉积物变形在成因上可以大致分为地震成因和



图5 DT3522井延7油层组液化砂岩脉

Fig. 5 Liquefied sandstone vein in Y7 oil layer of DT3522 well

非地震成因^[6]。非地震成因包括冰融作用、天然气水合物泄漏、水力破裂、滑坡或滑塌、泥石流等。早中侏罗世,鄂尔多斯盆地为偏潮湿的暖温带气候^[24],研究区以地形平缓的河流-滨湖相沉积为主,不具备发生冰融作用、天然气水合物泄露和泥石流的条件;水下坍塌往往形成于具有陡坡的沉积前缘地带,所形成的软沉积物变形以大型的协调或不协调褶曲为主,也与上述介绍的软沉积物变形特征不符。安塞延河剖面的软沉积物变形成因应与地震相关,本文将从以下3个方面进一步深化成因探讨。

3.1 区域火山活动背景

早中侏罗世,华北岩石圈处于弱伸展状态^[25-27],鄂尔多斯盆地西南缘和东北缘发生4次火山喷发事件(179.2±0.79 Ma, 175.2±2.4 Ma, 171.0±1.0 Ma, 168.4±1.3 Ma)^[28-29],4次火山活动时间与延7油层组沉积时代具有同时性。

3.2 变形构造局限在某一地层单位内,且盆地内区域上可对比

安塞延河剖面软沉积物变形层位为延7油层组^[2],定边DT3522井岩心中的液化砂脉也属于延7油层组,两者相隔约110 km。在延安西杏子河裴庄剖面,曾报道过延7油层组的负载构造、枕状构造等软沉积物变形构造,且变形层位也被限定在未变形层位之间^[2]。因此,定边DT3522井、安塞延河剖面、延安西杏子河裴庄剖面的软沉积物变形层位在盆地内可对比,均被限定在未变形层位之间。

3.3 特征地震成因变形构造

有固定层位,沿走向在一定距离内分布的枕状构造层是地层记录中的古地震证据^[23]。枕状构造地震成因的观点也被多数学者所接受。安塞延河剖面断续发育的枕状构造层,延伸约14 m,单个枕状构造砂体的宽度可达1 m以上,具有地震成因特征。负载构造的触发因素有很多,但大型(直径大于1 cm)或巨型(直径大于5 cm)负载与球枕构造一定为强地震触发所致^[23]。安塞延河剖面负载构造和球枕构造规模较大,

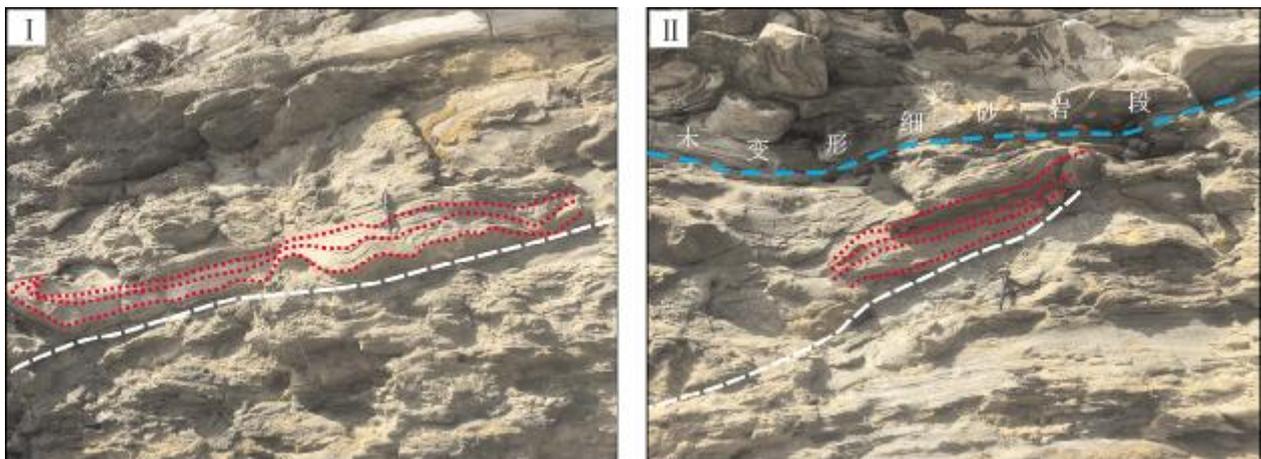


图6 安塞延河剖面倾斜的枕状构造砂体

Fig. 6 Inclined pillow structure sand body in Yanhe section

I—图3 I放大(enlargement of inset I in Fig. 3); II—图3 II放大(enlargement of inset II in Fig. 3)

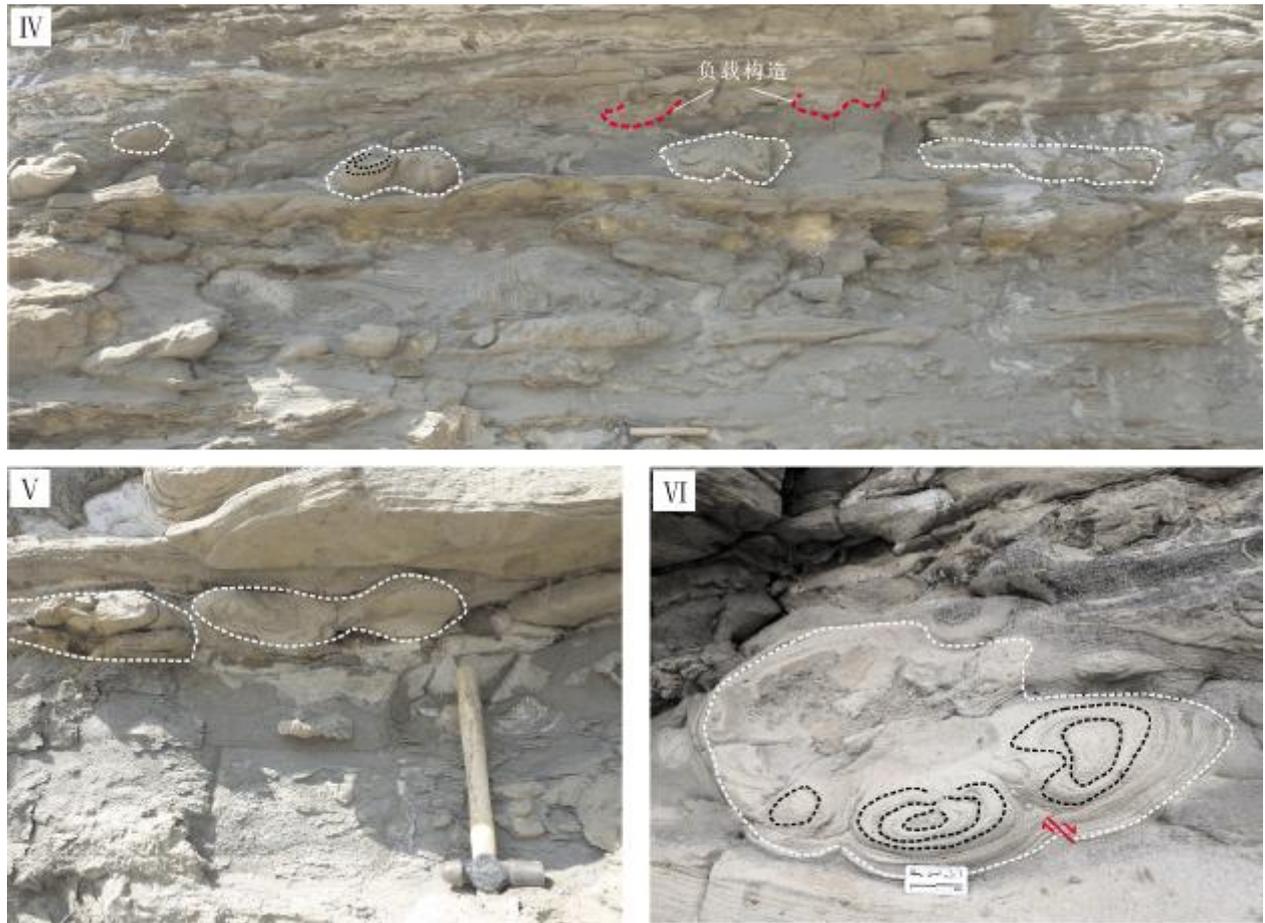


图 7 安塞延河剖面负载构造和球枕构造

Fig. 7 Load structure and ball-and-pillow structure in Yanhe section

IV—图 3 IV 放大(enlargement of inset IV in Fig. 3); V—图 3 V 放大(enlargement of inset V in Fig. 3); VI—图 3 VI 放大(enlargement of inset VI in Fig. 3)



图 8 安塞延河剖面微型斜卧褶曲

Fig. 8 Micro oblique fold in Yanhe section

图 3 VII 放大(enlargement of inset VII in Fig. 3)

单个球枕构造的直径多在 18 cm 左右. 尹国勋^[30]将微型斜卧褶曲解释为未固结的沉积物对突发性地震的振

滑响应,其具有长、高仅为数厘米,轴向指示盆地中心方向的特征. 另外,安塞延河剖面中的微型斜卧褶曲与 Sims 在 Van Norman 湖顶部沉积物中观察到的现代地震成因(震级 6.6 级,震源深度 12.8 km)的褶曲极其相似^[31].

综合研究区软沉积物变形层位的时代、盆地周缘存在火山活动背景、变形层位在盆地大范围内可对比性、变形构造反映的地震成因实例等特征,可以确定安塞延河剖面和 DT3522 井的软沉积物变形构造主要形成于火山地震活动.

4 对地震期次、强度的解释

与历史地震一样,地层中的地震记录可以辨认出地震次、幕及活跃期^[32]. 在地震活动期次方面,可以通过软沉积物变形的垂向变形特征差异进行推测. 安塞

延河剖面由下而上,具有弱变形 A 段、强变形 B 段、强变形 C 段 3 套变形层位(图 3),弱变形 A 段和强变形 B 段以局部的液化均一层作为分界,强变形 B 段和强变形 C 段以厚度约 10 cm 的未变形细砂岩作为分界。弱变形 A 段,液化变形不强烈,发育泥火山相关的变形构造;强变形 B 段液化变形强烈,发育枕状构造、球枕构造、液化角砾岩、泥火山、液化变形纹层等变形构造;强变形 C 段中负载和球枕构造极其发育,可见微型斜卧褶皱。因此,盆地周缘的 4 次火山地震活动在安塞延河剖面上仅可以识别出 3 套软沉积物变形层位,对应 3 期地震活动,且地震强度呈由弱变强的特征。

5 结论

通过观察安塞延河剖面 and DT3522 井岩心,在中侏罗世延安组延 7 油层组发现与液化作用相关的枕状层、液化砂岩脉、液化角砾岩、泥火山,以及负载构造相关的负载构造、球枕构造等 9 种软沉积物变形构造。

枕状构造、大型的负载和球枕构造、微型斜卧褶皱及液化均一层均为特征地震成因变形构造,并且变形层位局限在同一地层单元内,在盆地大范围内可以进行对比,结合中侏罗世时期盆地周缘火山活动背景,认为安塞延河剖面 and DT3522 井的软沉积物变形应该为火山地震活动所致。

安塞延河剖面垂向上软沉积物变形的层位特征、变形强度表明,剖面自下而上发育弱变形 A 段、强变形 B 段、强变形 C 段 3 套变形层位,对应 3 期地震活动,且地震强度呈由弱变强的特征。

参考文献:

- [1] 赵激林,刘孟慧. 湖相沉积岩中的同生变形构造及其地质意义[J]. 岩石学报,1988,4(4):14-21.
- [2] 黄天坤,任战利. 鄂尔多斯盆地中侏罗统延安组软沉积物变形构造特征研究[J]. 西北大学学报(自然科学版),2019,49(2):248-257.
- [3] 钟宁,蒋汉朝,李海兵,等. 青藏高原东部河湖相沉积中的软沉积物变形的成因类型及其特征[J]. 地球学报,2020,41(1):23-36.
- [4] 李林林,李德文. 古地震学研究新探索——湖泊沉积古地震研究进展[J]. 地球物理学进展,2018,33(6):2241-2250.
- [5] Velázquez-Bucio M M, Garduño-Monroy V H. Soft-sediment deformation structures induced by seismic activity in the San Pedro el Alto area, Acambay graben, Mexico[J]. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2018,35(1):28-40.
- [6] 杜远生,余文超. 地震和非地震引发的软沉积物变形[J]. 古地理学报,2017,19(1):65-72.
- [7] 贺静,冯胜斌. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长 8 段液化柱及相关软沉积物变形[J]. 地质学报,2017,91(3):645-657.
- [8] 邵珠福,钟建华,范莉红,等. 辽河西部凹陷南段沙河街组三段震积岩特征及石油地质意义[J]. 石油学报,2014,35(3):439-449.
- [9] 邵珠福,钟建华,李勇,等. 青岛灵山岛晚中生代重力流沉积特征及环境分析[J]. 地质论评,2014,60(3):555-566.
- [10] 杨文涛,汪校锋,杨江海,等. 豫西义马地区中—晚三叠世古地震引起的软沉积物变形构造[J]. 古地理学报,2011,13(6):635-644.
- [11] 高红灿,郑荣才,陈发亮,等. 东濮凹陷古近系沙河街组震积岩的认识及意义[J]. 古地理学报,2010,12(4):384-398.
- [12] 江胜国,钟建华,李旭平,等. 松辽盆地三肇凹陷姚家组震积岩岩心识别[J]. 特种油气藏,2010,17(2):39-44.
- [13] Kuenen P H. I.—Experiments in geology [J]. Transactions of the Geological Society of Glasgow, 1958,23:1-28.
- [14] 冯先岳. 地震振动液化形变的研究[J]. 内陆地震,1989,3(4):299-307.
- [15] 陈俊飞,张昌民,朱锐,等. 软沉积物滑塌变形物理模拟及变形机理分析[J]. 古地理学报,2017,19(1):139-146.
- [16] Owen G. Experimental soft-sediment deformation: Structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples [J]. Sedimentology, 1996,43(2):279-293.
- [17] 杜远生,韩欣. 论震积作用和震积岩[J]. 地球科学进展,2000,15(4):389-394.
- [18] 杜远生. 中国地震事件沉积研究的若干问题探讨[J]. 古地理学报,2011,13(6):581-586.
- [19] 田媛,钟建华,王书宝,等. 鄂尔多斯盆地富县探区三叠系延长组震积岩及其地质意义[J]. 古地理学报,2015,17(4):541-552.
- [20] 杜芳鹏,刘池洋,王建强,等. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组软沉积物变形特征及构造意义[J]. 现代地质,2014,28(2):314-320.
- [21] 赵俊峰,屈红军,林晋炎,等. 湖泊三角洲沉积露头精细解剖——以鄂尔多斯盆地裴庄剖面为例[J]. 沉积学报,2014,32(6):1026-1034.
- [22] 王建民. 鄂尔多斯盆地南部延 7+8 油层组滨浅湖滩坝体系沉积特征[J]. 石油与天然气地质,2013,34(5):672-678.
- [23] 乔秀夫,李海兵. 枕、球-枕构造:地层中的古地震记录[J]. 地质论评,2008,54(6):721-730.
- [24] 葛玉辉,孙春林,刘茂修. 鄂尔多斯盆地东北缘中侏罗统延安组植物群与古气候分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2006,36(2):164-168.
- [25] 张岳桥,廖昌珍,施炜,等. 论鄂尔多斯盆地及其周缘侏罗纪变形[J]. 地学前缘,2007,14(2):182-196.

(下转第 418 页/Continued on Page 418)

- 域构造意义[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 199-208.
- [5]刘俊来, 纪沫, 申亮, 等. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(5): 618-637.
- [6]刘俊来, 纪沫, 夏浩然, 等. 华北克拉通晚中生代壳-幔拆离作用: 岩石流变学约束[J]. 岩石学报, 2009, 25(8): 1819-1829.
- [7]申亮, 刘俊来, 胡玲, 等. 辽东半岛大营子拆离断层系及其区域构造意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(4): 437-451.
- [8]纪沫, 刘俊来, 胡玲, 等. 辽南变质核杂岩饮马湾山和赵房岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 173-181.
- [9]李建波, 鲁勇花, 蒋振频. 辽南万福变质核杂岩韧性剪切带的应变与剪切作用类型[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(3): 238-245.
- [10]郑亚东, 曾令森, 李健波, 等. 辽南中生代造山期缩短滑脱与晚造山伸展拆离构造[J]. 地质科学, 2009, 44(3): 811-824.
- [11]林伟, 王军, 刘飞, 等. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1791-1810.
- [12]许志琴, 李海兵, 王宗秀, 等. 辽南地壳的收缩作用及伸展作用[J]. 地质论评, 1991, 37(3): 193-202.
- [13]吴福元, 杨进辉, 柳小明. 辽东半岛中生代花岗岩质浆作用的年代学格架[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 305-317.
- [14]Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, et al. The Liaonan metamorphic core complex, southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of eastern Liaoning, Korea and contiguous areas[J]. Tectonophysics, 2005, 407(1/2): 65-80.
- [15]翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 285-297.
- [16]赵越, 徐刚, 张拴宏, 等. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 319-328.
- [17]许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 339-353.
- [18]仲米山, 王忠江, 敖光, 等. 张广才岭二浪河组火山岩的锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. 地质调查与研究, 2017, 40(3): 161-168, 177.
- [19]Lin W, Faure M, Monié P, et al. Polyphase Mesozoic tectonics in the eastern part of the North China Block: Insights from the eastern Liaoning Peninsula massif (NE China)[C]//Zhai M G, Windley B F, Kusky T M, et al. Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning Under Eastern Asia. Geological Society, London, Special Publications, 2007: 153-169.
- [20]Lin W, Faure M, Monié P, et al. Mesozoic extensional tectonics in Eastern Asia: The south Liaodong Peninsula metamorphic core complex (NE China)[J]. The Journal of Geology, 2008, 116(2): 134-154.
- [21]Yang J H, Wu F Y, Chung S L, et al. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton[J]. GSA Bulletin, 2007, 119(11/12): 1405-1414.
- [22]黎彤, 袁怀雨. 大洋岩石圈和大陆岩石圈的元素丰度[J]. 地球化学, 2011, 40(1): 1-5.
- [23]李瑞峰, 刘小滨, 费书民, 等. 关于矿源层和成矿物质来源的探讨[J]. 吉林地质, 2013, 32(1): 20-25, 31.

(上接第 460 页/Continued from Page 460)

- [26]张岳桥, 董树文, 赵越, 等. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1462-1480.
- [27]张岳桥, 廖昌珍. 晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地改造[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 28-40.
- [28]李振宏, 董树文, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地中—晚侏罗世构造事件的沉积响应[J]. 地球学报, 2015, 36(1): 22-30.
- [29]李振宏, 冯胜斌, 袁效奇, 等. 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统凝灰岩年代学及意义[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 729-741.
- [30]尹国勋, 李春生. 震积构造特征[J]. 焦作矿业学院学报, 1993(2): 25-30.
- [31]Sims J D. Earthquake-induced structures in sediments of Van Norman Lake, San Fernando, California[J]. Science, 1973, 182(4108): 161-163.
- [32]乔秀夫. 中国震积岩的研究与展望[J]. 地质论评, 1996, 42(5): 317-320.