

文章编号: 1000-0550(2006)05-0666-06

济阳拗陷古近纪软沉积变形层中的环状层理及成因^①

袁 静¹ 陈 鑫¹ 田洪水²

(1 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院 山东东营 257061; 2 山东建筑工程学院 济南 250014)

摘 要 主要通过钻井岩心观察和岩石薄片鉴定等手段对渤海湾盆地济阳拗陷古近纪环状层理进行研究。研究结果表明, 济阳拗陷古近纪软沉积物变形层中的环状层理类型多样, 形态复杂, 计有光滑圆环状及蝌蚪状带“小尾巴”的环状层理、马尾丝或串珠状不规则环圈的环状层理、与阶梯状微断裂伴生的环状层理、链条状环状层理群、纺锤型环状层理群和中心为“飞石”环圈较光滑的环状层理等 6 种。综合分析认为震动塌落、震动拉伸变形、地震断裂面的摩擦作用、氧化还原反应和扩散作用是环状层理的主要成因, 前三种成因的环状层理往往与其他震成构造伴生, 可作为震积岩的良好标志。环状层理的其他成因还包括: 地震波传播方式的影响、地球自转产生的涡旋的影响、“滚雪球”效应、间歇胶结作用以及生物成因等。研究环状层理必须综合考虑构造位置、应力条件、沉积环境、沉积特征、围岩条件等因素的影响和控制作用。

关键词 环状层理 成因 震积岩 古近系 济阳拗陷

第一作者简介 袁静 女 1972 年出生 副教授 博士 沉积学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

环状层理(loop bedding)在国内外文献中少有报道^[1~3]。1998 年, Calvo 等对环状层理进行了描述, 指出环状层理是大量纹层间歇性的被突然限制而呈现的一种环状或链条状形态的一种层理^[4]。2000 年, Rodriguez Pascua 等在西班牙 Pirebeitic 的震积岩中发现了很多环状层理, 并且提出环状层理可能是砂泥质沉积物受地震影响而形成的^[5], 是细粒薄互层的砂泥质沉积物在较弱的地震作用(震级低于 5 级)下发生的断裂变形, 呈环圈状或链条状。Massimo Mor etti 等^[6], Goffredo Mariotti 等^[7] 专文讨论了与环状层理极为相似的负载囊(bad cast)和球枕构造(ball and pillow structure)或枕状层(pillow beds)的地震成因机理。

济阳拗陷位于渤海湾盆地东南缘, 郯庐断裂带西侧, 是在晚白垩世末期开始的上地幔上隆所引起的伸展裂陷作用的构造背景上发育起来的断陷盆地。该拗陷新生代沉积了厚达数千米的河湖相地层, 目前已在古近纪孔店组一段、沙河街组四段、三段和二段下部发现了震积岩^[8~11](图 1), 其中的软沉积物变形层中发育形态各异的环状层理, 超出了前人总结的形态特征。本文拟从环状层理形态类型和特征的分析入手, 探讨其可能的成因, 希望抛砖引玉, 促进对类似软沉积物变形构造的系统研究。

1 环状层理的形态类型及特征

1.1 光滑圆环状及蝌蚪状带“小尾巴”的环状层理

这种环状层理发育在细粉砂与泥质薄互层沉积中, 一般呈饱满椭圆状, 长 9~10cm, 高约 6~7cm, 上部常有蝌蚪状“小尾巴”(图 2A), 可单独出现, 也可密集成群。

1.2 马尾丝或串珠状不规则环圈的环状层理

这种环状层理在济阳拗陷的震积岩中较为常见, 出现在以泥为主的粉砂岩与泥岩的薄间互层中, 粉砂岩、泥岩条带构成的环圈呈波状、槽状起伏, 若断若续, 形似马尾丝或串珠状。这种环状层理长高比较大, 一般为 5~10cm(图 2B)。

1.3 与阶梯状微断裂伴生的环状层理

这类环状层理在研究区震积岩中也较常见, 赋存岩性一般为砂泥薄互层(以砂为主), 同心环圈层不很清晰, 呈阶梯状微断裂, 单个圈环长 9~10cm, 高 5cm 左右(图 2C)。

1.4 链条状环状层理群

这种层理群赋存于以泥为主的泥砂夹互层中, 由单个外形光滑的椭圆状环状层理相互连接而成。单个链环长 8~15cm, 高 3~5cm, 相邻链环在相接部位光滑收敛为泥质条带而成群出现, 内部环圈不清晰,

① 国家“十五”科技攻关项目(项目编号 2001BA605A09)资助。

收稿日期: 2005-02-15 收修稿日期: 2006-02-17

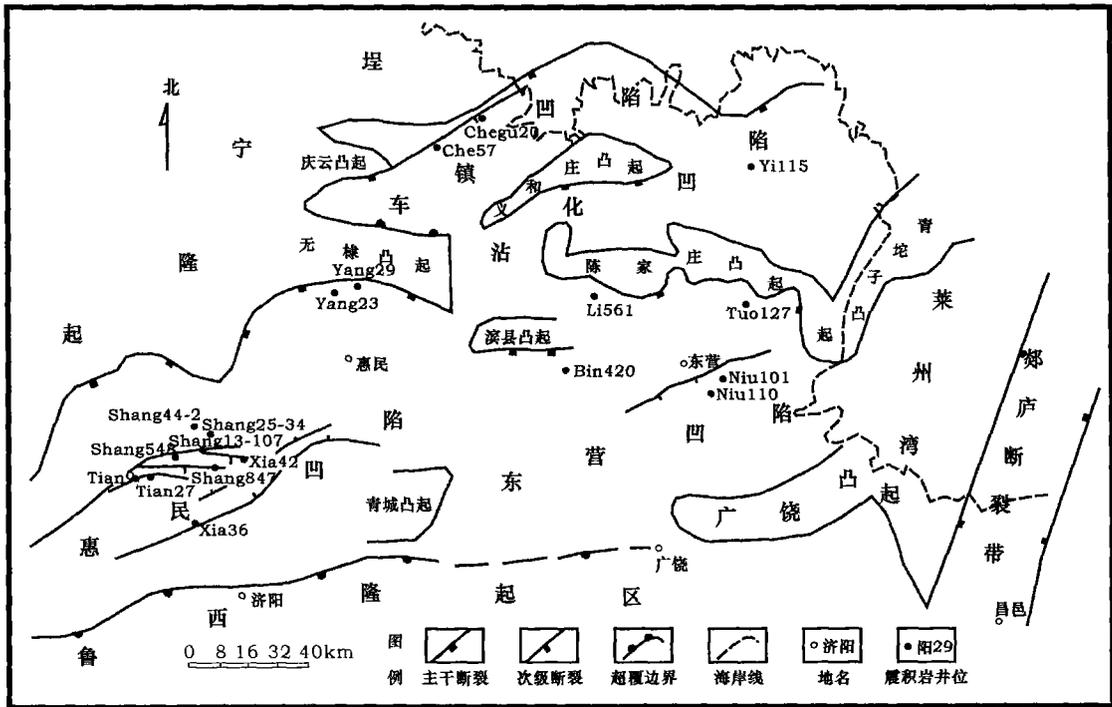


图 1 济阳拗陷构造区域及主要震积岩井位略图 (据陈世悦等^[6]修改)

Fig 1 the structure division and the wells of seismicite in Jiyang sub-basin Paleogene (modified from Chen Shiyue *et al*^[6])

构成厚约 8 cm 左右的环状层, 下方可见震裂缝等震成构造 (图 2D)。

1.5 纺锤型环状层理群

东营凹陷 Niu110 井埋深 3 006.3 m 处发育的环状层理群为多个纺锤型长椭圆状环状层理, 椭圆面不光滑, 两端较尖, 单个环圈厚 2~4 cm 左右, 长 10~20 cm, 成群出现, 在细砂岩层中形成厚约 15 cm 的环状层理群 (图 2E), 上下围岩见同沉积微断层及液化砂岩脉。

1.6 环圈较光滑的环状层理

这种环状层理边缘光滑, 一般发育在块状细砂岩中或平行层理细砂岩中, 呈浑圆状, 中心为灰色或红色泥岩砾石, 向外是颜色深淡交互的同心环圈, 有时出现红色氧化环 (图 2F)。

2 环状层理的主要成因分析

研究区软沉积物变形层中的环状层理形态多样, 成因复杂。综合分析认为上述环状层理的主要成因震动塌落、震动拉伸变形、地震断裂面的摩擦作用、氧化还原反应和扩散作用等 4 种。其中成因于前 3 种作用的环状层理往往与其他震成构造伴生, 可作为震积岩的良好识别标志。

2.1 震动塌落成因

蝌蚪状带“小尾巴”的环状层理及其共生的光滑圆环状层理很可能是上层细粒的薄纹层 (<2 mm) 砂泥质软沉积互层由于剧烈震动而塌落到下伏震动液化而成的液化均一层中而形成的。

在地震波的影响下, 充满孔隙水的沉积物最易受到地震影响, 尤其是分选好的弱固结粉细砂层较分选较差的颗粒支撑的砂岩更易发生液化, 这时下伏的粉细砂层是构造形成过程中的主动方, 而上覆砂层呈现的是被动变形特征^[6,7]。受震动拉张之前, 富含水的砂层所承受的外力基本上由骨架承受, 颗粒之间靠在各种压力作用下的摩擦力和弱固结作用产生的粘滞力维持其本身的稳定。这时的砂层是稳定的, 颗粒骨架松散排列, 颗粒之间保留了大量的孔隙水 (图 3A)。震动作用时, 在 P 波和 S 波的作用下, 由于震动颗粒按重力重排的同时粘滞力骤然减小甚至消失^[6], 颗粒间的孔隙减小, 从而导致孔隙水排出。最初的孔隙水外泄应该是扩散作用和颗粒对水的推动过程。随着压力的不断增大, 而水的力学性质是体积难于压缩并且能承受极大压力, 这样骨架上的压力就转变为对孔隙水的异常高压。孔隙水在高压作用下载起颗粒形成液态流体, 液态流体在流动的过程中可



图 2 济阳坳陷古近系主要环状层理 (岩心直径 10 cm)

Fig. 2 Main loop bedding in Jiyang subbasin Paleogene (the diameter of cores being 10 cm)

A. 细粉砂与泥岩薄纹层间互, 蝌蚪状带“小尾巴”的环状层理, Ni110井, 井深 3 283.0 m; B. 粉砂与泥岩薄互层, 马尾丝状不规则边缘的环状层理, Ni110井, 井深 3 003.5 m; C. 粉细砂夹泥岩薄层, 与阶梯状微断裂伴生的环状层理, Shang 548井, 井深 3 232.2 m; D. 泥岩夹细粉砂岩条带, 链条状环状层理群, 相邻链环在相接部位光滑收敛为泥质条带 (黑色箭头所指) 下方可见震裂缝被泥质充填 (白色箭头所指), Shang 25~34 2 096.54 m; E. 细砂岩中的粉砂质泥岩透镜体, 纺锤型环状层理群, Ni110井, 井深 3 006.3 m; F. 平行层理细砂岩, 边缘较光滑的环状层理, 中心为红灰色泥岩砾石 (黑色箭头所指), Shang 741井 1~1.25。

搬运软沉积层中的其他颗粒。液态流体中的水、泥、砂混合而形成液化均一层^[12] (图 3B)。

此时, 上覆的塑性砂泥薄互层在重力或压力作用

下形成纹层发生卷曲变形的“大水滴” (图 3C) 状的负载囊 (load cast)^[10]。这种负载囊一般是规则的, 有时也呈不规则状。但不论哪种, 其粒度均大于下伏沉

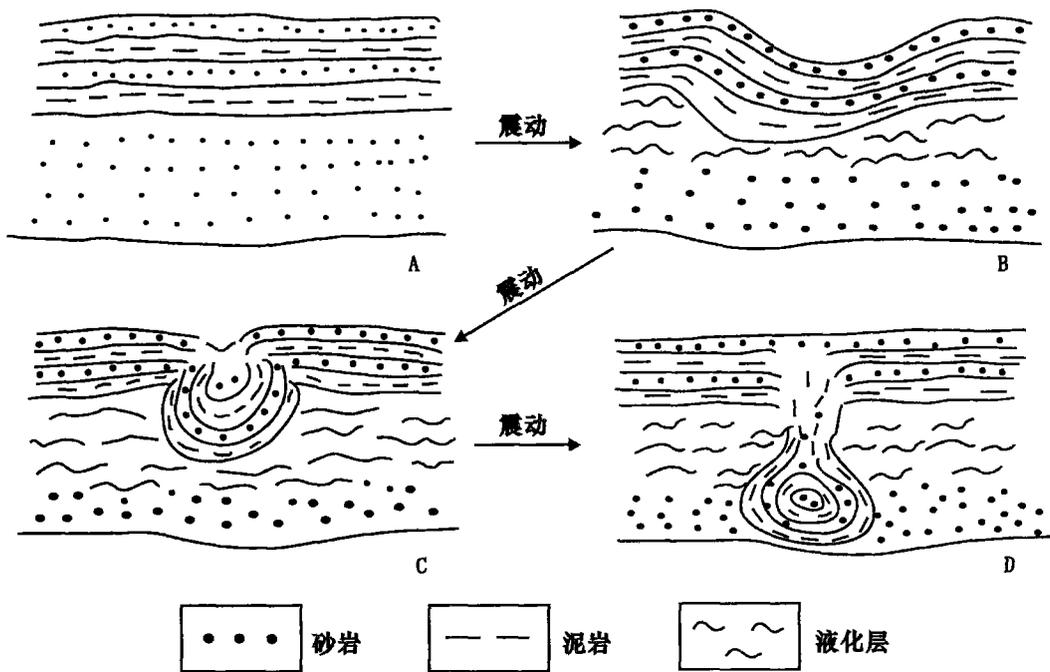


图 3 震动塌落形成环状层理过程示意图

Fig 3 Sketch map showing the process of loop bedding formation with shaking sinking

A. 未震前软沉积层; B 震后下层液化上层变形; C. 上层形成纹层变形的“水滴”; D. 震动塌落成环状层理

积层,且砂层为颗粒支撑。由于地壳的剧烈震动 ($M > 5^{5.6}$),“大水滴”震动塌落到下方的液化均一层中形成独立的环状层理,不具环状纹层者可统称为球枕构造 (ball and pillow structure)^[10] 或枕状层 (pillow beds)^[7]。在下落的过程中环状层理形成流动成因的“小尾巴”(图 3D 图 2A)。从环状层理的尾巴可以判断环状层理的塌落方向,尾巴指向环状层理的母岩方向,与塌落方向相反。这种情况下形成的环状层理的直径与跌入下伏液化层的深度成正相关关系^[7.8]。

另外一种情况是,当上述过程出现在上覆软沉积物以泥为主,且单层厚度较大 ($> 8 \text{ mm}$) 的塑性软沉积层中时,震动拉张作用使塑性软沉积岩层变得受力不均衡,从而出现与香肠构造^[13] 相似的厚薄不均的,成波形状分布的马尾丝或串珠状构造。进而在重力或压力作用以及强烈的震动下塌落到下伏液化均一层中形成环状层理(图 2B)。

第三种情况是当软沉积层中脆性层砂质沉积物受地震引发的侧向应力而引起沉积层拉伸形成张性微断裂的同时塌落到下伏的液化均一层中形成环状层理(图 2C)。

2.2 震动拉伸变形

以泥为主的泥砂夹互层在受到强度较弱 ($M < 3^{5.1}$) 而持续时间较长的震动拉张作用时由于塑性大

而很难断裂形成末端光滑收敛相互链接的串珠状构造,在此过程中,由于粘土矿物具有很强的吸附性和粘滞性,同时由于吉布斯自由能的影响,使原始纹层随“串珠”发生变形形成边缘光滑内部环圈不清晰的环状纹层群(图 2D)。

2.3 地震断裂面的摩擦作用

研究区古近纪位于东部拉张盆地,在震动拉张背景下岩层容易出现断裂。在断裂面附近的软沉积物会受到断层面上强烈剪切力的影响。在持续时间比较长的地震断裂过程中,地震引起的断裂面与塑性的软沉积层发生摩擦,靠近断裂面的软沉积物中形成许多由断裂面缓慢移动的摩擦力来提供动力的小环流,沿着断裂面的一系列小环流使塑性软沉积物形成独立出现的环状层理群。由于断裂面延伸很远,在断裂面附近产生纺锤型的环状层理也会延伸很远,这种解释对于解释长轴方向与研究地区大裂缝方向大体一致的环状层理的成因应该是合理的^[1.5]。

软沉积物在形成环状层理后还可能受到拉伸作用,因此现今观察到的环状层理可能在刚形成时是类似圆形的,后来由于拉伸作用的影响变成纺锤型,椭圆层面也因此变得不光滑,如图 2E 即可能成因于地震断裂面的摩擦作用和震动拉伸变形的共同作用。

2.4 氧化还原反应和扩散作用

发育在块状细砂岩中或平行层理细砂岩中的具有泥砾核心的边缘光滑环状层理(图2F)可能成由于氧化还原反应和扩散作用。

风暴回流将滨浅湖或陆上环境中的泥砾带到正常波基面之下,泥砾呈“孤石”、“飞石”落入砂岩中,产生“刺穿层理”现象,梁定益等曾描述过类似现象,推测这是地震—海啸岩的特征^[14]。

2.4.1 氧化还原反应

当泥砾或其他颗粒落入软沉积物中时,可能与其发生化学反应。最常见的是氧化还原反应,当容易氧化的颗粒落入含氧量比较高的或者含有易还原物质的软沉积物中时,或者易还原的颗粒落入易氧化的软沉积物中时,都会发生氧化还原反应。由于氧化还原反应的程度不同,在颗粒内部容易出现环状的红色的或者其它颜色的氧化圈,这种氧化圈在剖面上表现出环状层理。这种环状层理的细层之间的岩性差别一般比较小,差别程度主要取决于氧化还原反应的剧烈程度。

2.4.2 扩散作用

扩散作用的影响主要指当泥砾或其他颗粒中含有某种易扩散的含色素离子的矿物时,在其落入软沉积物后,这种矿物质就会缓慢地向软沉积物中扩散而在颗粒外围的剖面上呈现出环状。如果无色颗粒落入含有颜色的软沉积物中,软沉积物中含色素离子的矿物向颗粒中扩散,由于扩散程度的不同而在颗粒内部表现出环状纹层。这种环状层理主要是因为颜色的不同形成的,在岩性上差别非常小。

上述氧化还原反应和扩散作用形成的环状层理类似成岩结核,与古地震作用可能无关或仅有间接联系。

3 环状层理的其他成因

3.1 地震波传播方式的影响

根据惠更斯(Huygens)原理^[15],地震波在均匀地层传播过程中,如果遇到与均匀地层差别比较大的颗粒时,很容易以这个均匀层中的突变介质作为新的子波源,并且会以新的子波源为中心向各个方向发出新的子波。如果原来的地震波跟均匀层中的突变颗粒的固有频率相等,那么这个不均匀颗粒介质将会产生共振现象,将会引起剧烈的震动。子波源附近的软沉积物可能会以产生子波源的突变介质为中心,在剧烈的地震波的影响下产生环状层理。

地震时还会产生一些椭圆极化的面波,如瑞雷面

波,这类面波可能对软沉积层也有影响。面波在介质的表面或岩层的分界面上传播。由于软沉积层和上下的岩层的物理性质差别比较大,瑞雷面波可能会在软沉积层以椭圆的形态向前传播,因此适当频率的瑞雷面波可能会引起沉积物的环状构造。

3.2 地球自转产生的涡旋的影响

由于地球自转的影响,当液态软沉积物在流动的过程中或者在注入到裂缝或者其他孔隙时,液态流体会在涡旋力的作用下产生环流,这种环流可能影响软沉积物而形成环状层理。

海平面变化、生物扰动、融冻扰动作用以及滑塌、差异压实、风暴浪等也可引起沉积物液化而导致负载囊或球枕构造、枕状层的形成,但其特征与地震出发的环状层理有明显不同^[6,7]。此外,当密度比较大的颗粒滚入半固结的软沉积层中时,由于软沉积层有一定的粘滞性,可能会以这个密度较大的颗粒为核滚动而产生“滚雪球”效应,在滚动过程中形成球状构造,在其剖面上就表现出环状层理。另外,软沉积中的化学溶液在颗粒表面发生间歇性胶结作用时,由于胶结物表面氧化程度不同,颜色深浅不一,也可能形成环状层理。再如,植物的年轮如果在地层中保存完好形成化石,在剖面上也呈现环状层理的形态。

4 结束语

研究区古近系环状层理类型多,形态复杂,其成因主要是震动塌落成因、震动拉伸变形成因、地震断裂面的摩擦作用、风暴回流中“飞石”引起的氧化还原反应和扩散作用等。其中前3种成因的环状层理往往与其他震成构造伴生,可以作为震积岩的识别标志。

在研究与古地震有关的软沉积物中的环状层理时要注意与海平面变化、生物扰动、融冻扰动作用、滑塌、差异压实、风暴浪、地球自转作用、间歇胶结作用等非地震成因的形成的环状层理区分开来。还应注意的是,研究环状层理必须综合考虑构造位置、应力条件、沉积环境、沉积特征、围岩条件等因素的影响和控制作用。同其他构造一样,单一成因的环状层理是较少的,大部分是复合成因的;同样是地震成因的环状层理,由于沉积物特征不同,大地构造背景不同也会呈现不同的形态。

参考文献(References)

- 1 Cole R D, Picard M D. Primary and secondary structures in oil shale

- and other fine grained rocks Green River Formation (Eocene) Utah and Colorado Utah. *Geology*, 1975 2: 49~67
- 2 Gibling M R, Tantusikit G, Uttamow, *et al* Oil shale sedimentology and geochemistry in Cenozoic Mae Sot Basin Thailand. *AAFG Bulletin* 1985 69: 767~780
 - 3 Trawin N H. Palaeoecology and sedimentology of the Achanarras fish bed of the Middle Old Red Sandstone Scotland. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh Science* 1986 77: 21~46
 - 4 Calvo J R, Rodríguez Pascua M A, Martín Velázquez S *et al* Micromorphology of lacustrine laminae sequences from Late Miocene formations of SE Spain: an interpretation of hop bedding. *Sedimentology* 1998 45: 279~292
 - 5 Rodríguez Pascua M A, Calvo J R, De Vicente G, *et al* Soft sediment deformation structures interpreted of the Prebetic Zone SE Spain and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the Late Miocene. *Sedimentary Geology* 2000 135(1-4): 75~85, 117~135
 - 6 Massimo Moretti, Piero Pieri & Marcello Tropeano. Late Pleistocene soft sediment deformation structures interpreted as seismites in paralic deposits in the city of Bari (Apulian foreland southern Italy). *Geological Society of America Special Paper* 2002 359: 75~85
 - 7 Goffredo Mariotti, Laura Conda & Marco Brandano *et al* Indicators of Paleoseismicity in the lower to middle Miocene Guadagnolo Formation Central Apennines Italy. *Geological Society of America Special Paper* 2002 359: 86~98
 - 8 陈世悦, 袁文芳, 鄢继华. 济阳拗陷早第三纪震积岩的发现及意义. *地质科学* 2003 38(3): 413~424 [Chen Shiyue, Yuan Wenfang, Yan Jihua. Discovery and significance of earthquake event deposits of Early Tertiary in the Jiyang depression. *Chinese Journal of Geology* 2003 38(3): 413~424]
 - 9 袁静. 山东惠民凹陷古近纪震积岩的特征及其地质意义. *沉积学报*, 2004 22(1): 41~46 [Yuan Jing. The property and geological significance of seismites of Paleogene in Huimin sag Shandong Province. *Acta Sedimentologica Sinica* 2004 22(1): 41~46]
 - 10 杨剑萍, 陈世悦, 袁静, 等. 济阳拗陷古近纪地震岩特征. *沉积学报*, 2004 22(2): 281~287 [Yang Jianping, Chen Shiyue, Yuan Jing, Yan Jihua *et al* The features of seismites in Jiyang Subbasin Paleogene. *Acta Sedimentologica Sinica* 2004 22(2): 281~287]
 - 11 袁静. 中国震积作用和震积岩研究进展. *石油大学学报*, 2005 29(1): 144~149 [Yuan Jing. Research of seismic deposition and seismites of China. *Journal of the University of Petroleum, China* 2005 29(1): 144~149]
 - 12 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 等. 碳酸盐岩振动液化地震序列. *地质学报*, 1994 68(1): 16~32 [Qiao Xiufu, Song Tianrui, Gao Linzhi *et al* Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction. *Acta Geologica Sinica* 1994 68(1): 16~34]
 - 13 Rossetti D F & Goes A M. Deciphering the sedimentological imprint of paleoseismic events: an example from the Aptian Codo formation northern Brazil. *Sedimentary Geology* 2000 135: 137~156
 - 14 梁定益, 聂泽同, 宋志敏. 再论震积岩及震积不整合: 以川西、滇西地区为例. *地球科学* 1994 19(6): 845~850 [Liang Dingyi, Nie Zetong, Song Zhimin. A restudy on seismite and seismo unconformity: taking western Sichuan and western Yunnan as an example. *Earth Science* 1994 19(6): 845~850]
 - 15 陆基孟. 地震勘探原理. 北京: 石油大学出版社, 2001. 18~19 [Lu Jimeng. *Earthquake Exploratory Theory*. Beijing: Press of the University of Petroleum, 2001. 18~19]

Formation of Loop Bedding in Jiyang Sub-basin Paleogene

YUAN Jing¹ CHEN Xin¹ TIAN Hongshui²

(1. University of Petroleum of China Dongying Shandong 257061; 2 Shandong Institute of Architecture and Engineering Jinan 250014)

Abstract The characteristics and formation of loop bedding of Paleogene in Jiyang sub-basin were studied through cores observation and rock slices identification mainly. There are 6 kinds of hop bedding such as smooth pillow shape, horsetail or pinch and swell hop, associated with syn-sedimentary microfracture, catenarian loop bedding group, spindle loop bedding group and loop bedding with a slingshot as core in the studied area. Four main formations of loop bedding in Jiyang sub-basin were upper layers fall down in the process of earthquake, tightening distortion due to earthquake, the friction of earthquake-related surface of fault and the effect of redox and diffuse other formations of loop bedding comprise the effect of earthquake wave, the effect coming from circum-rotate of globosity rotation, "snowball" function, cementation intermittent, the effect of biology and so on. The tectonic location, stress condition, sedimentary environment, sediment characteristic and wall rock condition are the elementary factors considered in hop bedding study.

Key words hop bedding; cause of formation; seismites; Paleogene; Jiyang sub-basin