

苏北盆地高邮凹陷深凹带古近系戴南组 软沉积物变形构造及沉积模式研究

刘金华, 吴立峰, 乔力, 孙秀会, 孙晓庆

江苏油田地质科学研究院, 江苏扬州, 225012

内容提要: 软沉积物变形构造又称准同生变形构造, 其发育特征、分布规律以及沉积模式等的研究对油气储层研究具有重要意义。研究区多个油田的岩芯观察中发现了同生微断层、液化岩脉、液化扭曲变形、砂枕构造、自碎角砾岩等多种软沉积物变形构造, 并分析了形成各种软沉积物变形构造的不同应力环境和特征。通过软沉积物变形构造平面分布规律分析, 认为软沉积物变形构造随着边界断层真②断层和汉留断层断层面倾角变大出现的频率越高, 发育程度越强烈, 因而研究区软沉积物变形构造的发育频率与高邮凹陷深凹带的边界断层的坡度有关, 变形构造的产生和分布受到古地形的控制。并且该类变形构造在一定程度上改变了原始储层的物性和连通性。通过参考国内外的软沉积物变形构造成因模式, 提出了研究区的软沉积物变形构造沉积模式, 研究区软沉积物变形构造主要发育于边界断层形成的斜坡区附近, 从剖面上可以分为上部浅水区、中部斜坡区和下部深水区三个区带。

关键词: 软沉积物变形构造; 微断层; 液化变形; 沉积模式; 高邮凹陷; 苏北盆地

软沉积物变形构造又称准同生变形构造, 是指沉积物沉积之后、固结之前由于差异压实、液化、滑移、滑塌等形成的变形构造。软沉积物变形构造通常由强烈的外力触发引起, 这些外力除了地震以外, 还包括火山活动、海啸、风暴、重力滑坡或滑塌等。作为一种常见的沉积构造, 软沉积物变形构造的研究, 多年来一直受到国内外学者的重视, 最早的相关研究出现于20世纪六七十年代, 早期曾出现过软岩石变形、沉积物变形构造、准同生变形构造等多种称呼, 并且早期研究多停留于理论研究或者简单分类等研究层面 (Lowe, 1975; 曾允孚等, 1986; 赵澄林等, 1988; Wheeler, 2002)。近20年来, 软沉积物变形构造成为沉积构造研究中最活跃和最热门的内容, 国内外学者从软沉积物变形构造的分类、成因以及对油气勘探的影响等多方面进行了深入研究 (乔秀夫等, 1994, 2001, 2011, 2012; 张关龙等, 2006; 邸继华等, 2009)。例如鉴于不同学者对软沉积物变形构造的成因解释存在的问题, 2009年在意大利召开的第27届国际沉积学大会将“认识软沉积物变形的触发机制”作为一个专题进行讨论, 并于2011年在《Sedimentary Geology》杂志上作为专辑进行了出版 (李勇等, 2012)。近年来, 相关软沉积物变形构

造的报道多数与震积岩有关, 但发育于震积岩中的软沉积物变形具有典型的震积岩相序和部分特殊构造, 例如液化均一层等 (乔秀夫等, 1996, 2008; 杨剑萍等, 2004; 李勇等, 2012), 不能见软沉积物变形构造即说震积岩。从诱发机制上来研究软沉积物变形构造对沉积学来讲具有重要意义, 但对油气储层分布及有效性等的研究并不非常重要, 其发育特征、分布规律以及沉积模式等的研究对油气储层分析更为重要, 本次研究对软沉积物变形构造的特征、分布及成因进行分析, 以求获得对研究区储层分布具有指导意义的沉积发育模式。

1 区域地质概况

苏北盆地位于江苏省中—北部地区, 内部划分为4个呈近东西向展布的二级构造单元, 由南向北分别为东台拗陷、建湖隆起、盐(城)阜(宁)拗陷和滨海隆起。高邮凹陷位于苏北盆地南部东台拗陷中部, 南为(南)通扬(州)隆起, 北接柘垛低凸起与建湖隆起相连, 东起白驹凹陷, 东南靠吴堡低凸起与溱潼凹陷相连, 西接菱塘桥低凸起与金湖凹陷相隔, 东西长约100km, 南北宽约25~30km, 面积达2670 km², 呈北东向长条形分布, 新生界地层沉积厚达

7000m,是苏北盆地沉降最深的一个凹陷。高邮凹陷构造单元可划分为南断阶、深凹带和北斜坡三个部分(图1)。主要研究区为深凹带西部地区,该地区地层厚度大,是苏北盆地的重要含油气区之一(高丽坤等,2010;姚玉来等,2010)。

本次研究主要目的层为始新统戴南组,由下而上分别为戴一段和戴二段。在凹陷内不同构造部位由于箕状充填式沉积,其厚度变化较大(0~1200m),与下伏地层呈角度不整合接触。戴一段(E_2d_1)主要为灰棕色、棕红色泥岩、泥页岩与棕色细砂岩、粉细砂岩、粉砂岩互层,上部有黑色泥岩段或深灰色泥岩段的"五高导"段沉积,北斜坡北部及柘垛低凸起沉积缺失。戴二段(E_2d_2)为暗棕色、棕红色泥岩,粉砂质泥岩与浅棕色细砂岩、粉细砂岩互层,柘垛低凸起沉积缺失。戴南组发育三角洲、近岸水下扇、扇三角洲、滨浅湖以及深湖—半深湖等多种类型沉积,沉积特征复杂(姚玉来等,2010)。

2 软沉积物变形构造特征

作者在对高邮凹陷深凹带多个油田的岩芯观察

中发现了大量的软沉积物变形构造,这些变形构造对储层影响明显,其成因和分布的研究对油气储层描述具有重要意义。岩芯观察中发现的主要软沉积物变形构造有同生微断层、液化岩脉、液化扭曲变形、砂枕构造、自碎角砾岩等,其主要特征分述如下。

2.1 同生微断层

同生微断层是沉积物在沉积后经过一定的压实作用,致使地层具有一定的脆性,受到外力作用时在层内形成的微型断层(图2a、b)。研究区发育大量的同生微断层,砂岩、泥岩中均有微断层发育。由于泥岩塑性较强,砂岩脆性较强,所以在砂岩地层中微断层更为发育,但在泥砂岩互层中微断层得到了很好的显示,断距明显,形态清晰。研究区同生微断层多为应力拉张环境形成的,内部多见砂质填充物,偶见泥质充填物,断距从0.5~3cm不等,断面充填物宽度为0.1~1.5cm。

2.2 微裂缝

微裂缝形成于与同生微断层相同的应力环境,地层在变形过程中,经受的应力大小不同,并且地层性质存在差异,经受应力破坏的能力也有差异,较小

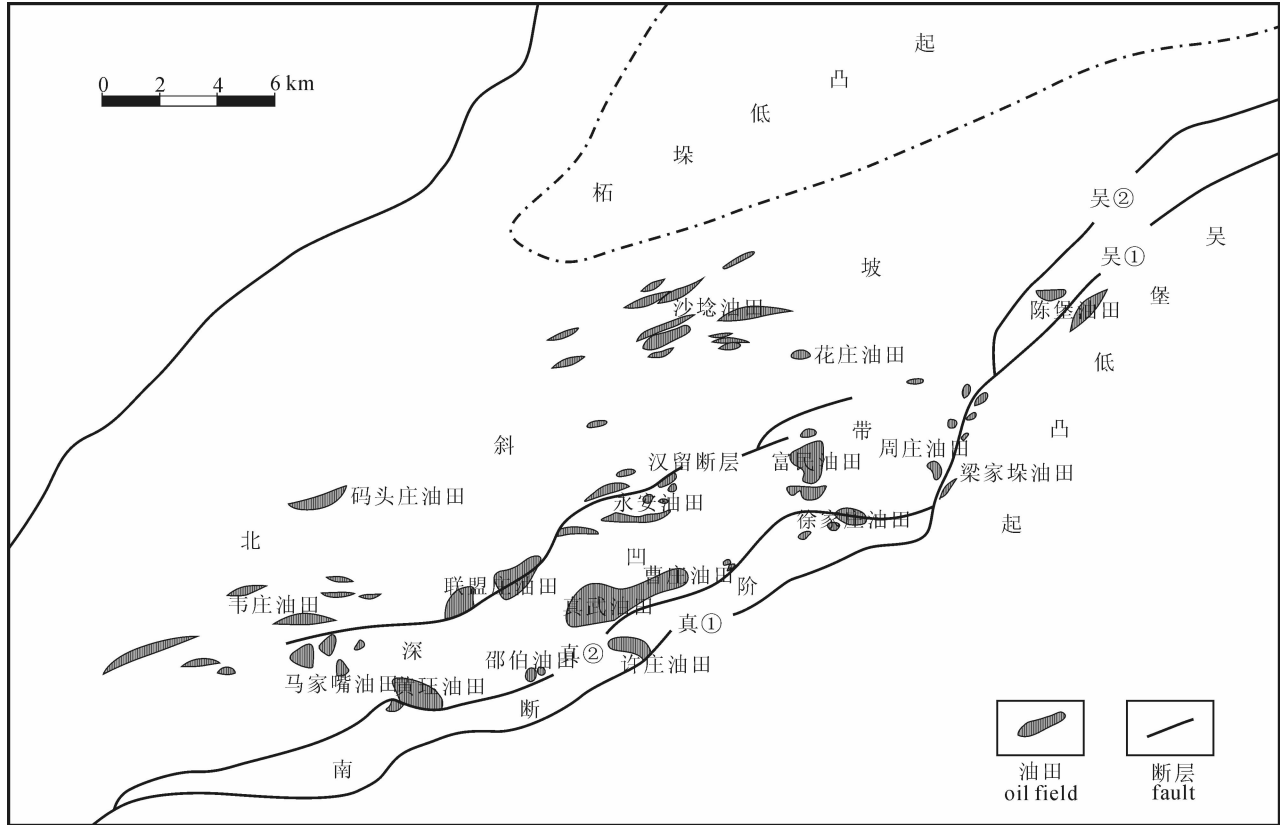


图1 江苏油田高邮凹陷区域位置图
Fig. 1 Regional geological sketch map of the Gaoyou Sag, North Jiangsu basin

的应力或者较强的地层均可导致形成的裂缝两侧地层未出现明显位移(图2c)。微裂缝多发育于泥砂岩互层地层和砂岩地层中,裂缝内常见泥质或砂岩填充物,充填物宽度0.3~3cm不等,并且常与泄水构造等伴生。

2.3 液化岩脉与泄水构造

液化岩脉是地层受到强烈应力时含水较高的岩层出现液化现象,液化后的沉积物沿着地层应力薄弱位置穿透上下岩层而形成泥、砂质岩脉或岩墙(钟建华等,2002;吕洪波等,2006,2011)。液化岩脉可与同生微断层伴生,多呈不规则状延伸,沿断层或者薄弱位置切穿地层的层理,液化岩脉大小不等,一般0.2~0.5cm宽,1~15cm长(图2d)。液化岩脉剖面呈弯曲不规则形态,多数情况中部膨大,向两端变细,但发育于微断层内部的液化岩脉沿断层分布,分叉现象较普遍。液化岩脉在穿入围岩时常因围岩存在一定塑性,导致围岩层理发生弯曲。

泄水构造与液化岩脉形成于相似的应力环境,两种构造均发育于液化地层中,是液化地层压力超出围岩承受力形成的(图2e)。由于地层在滑塌或者震动等过程中产生的剪切力促使同生沉积物中的颗粒发生位移,从而改变原有的排列状态,原始的地层骨架颗粒的支撑力由砂粒骨架转移至孔隙水,而引起孔隙水压力变大,最终导致砂层中产生液化作用,液化岩层内部压力超出围岩应力承受能力时,便产生泄水构造(乔秀夫等,1994,2011;Simms,2007;),泄水构造多与液化扭曲变形伴生。与液化岩脉相比,泄水构造无明显的边界或边界不清晰。

2.4 液化变形构造

液化变形构造是研究区发育最多、最常见的变形构造,该类沉积构造属于岩层受到应力挤压后发生液化变形,但是没有穿透围岩,在自身地层中发生的变形。根据变形的强烈程度分为液化扭曲变形、液化卷曲变形、砂枕构造等(图2f、g、h)。

液化扭曲变形是应力较弱情况下形成的液化变形构造,该类变形构造在研究区最为常见,液化扭曲变形的表现是在应力作用下具有层理特征的砂岩、泥质砂岩出现层理面的轻度弯曲来显示的(图2f)。液化卷曲变形是应力较强情况下形成的液化变形构造(图2g),卷曲变形仅仅是在程度上比扭曲变形更强烈,在成因上没有明显的区别。

砂枕构造是应力非常强的情况下形成的液化变形构造,又称之为枕状层,枕状体是液化的砂体在地层受力过程中,受到强烈的应力,地层下沉而成,沉

积物经液化后形成不规则枕状、球状,剖面上多呈长椭圆状、不规则状(Rodriguez-Pascua et al.,2000)。单个枕状体宽度一般5~20cm,高度5~10cm、长度20~40cm(图2h)。枕状体一般呈层状,枕状层厚变化较大,从20cm到150cm不等。砂枕构造的发育对地层有一定要求,砂枕构造主要发育于泥砂互层中,砂岩厚度不宜过大,而且成层分布,因而能够发育砂枕构造的地层较少,这便是砂枕构造一般呈层状分布的主要原因。纵向上,枕状层常与液化扭曲变形或卷曲变形伴生。

2.5 自碎角砾岩

自碎角砾岩是软沉积物变形构造中唯一具有一定破碎程度的沉积物,在保存较完整的滑塌岩层中,滑塌体产生一系列滑动面,在滑动面附近形成不规则的角砾岩化(图2i、j)。角砾大小从几毫米到十几厘米不等,杂乱排列,多为棱角状、次棱角状,没有分选性,最常见为泥岩自碎角砾岩。

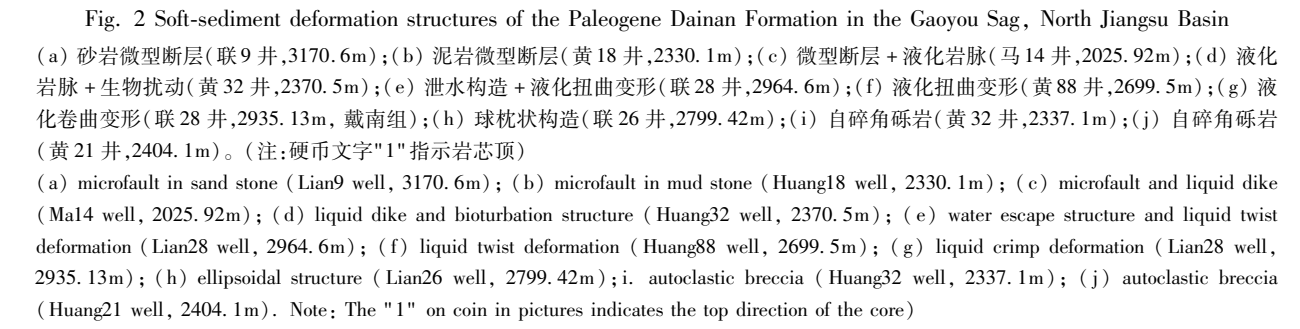
3 软沉积物变形构造分布规律及沉积模式

依据前人对软沉积物变形构造的分类,在研究区发现了同生微断层、液化岩脉、液化扭曲变形、砂枕构造、自碎角砾岩等多种沉积构造。通过软沉积物变形构造发育层段单层厚度和变形程度的统计,进行软沉积物分布规律的分析。在岩芯观察过程中,位于研究区北部汉留断裂带西部的马家嘴油田软沉积物变形构造单层厚为0.4~1.3m,厚度较薄,沉积构造以液化扭曲变形为主,变形程度较弱;联盟庄油田的软沉积物变形构造单层厚为1.2~7.5m,厚度大,沉积构造以液化卷曲变形和砂枕构造为主,偶见微断层等,局部枕状层厚度可达4m,沉积物变形程度大。发育于研究区北部的软沉积物变形构造的发育程度与断裂的断距大小关系密切,马家嘴油田位于汉留断裂带最西部,断距小;而联盟庄油田位于汉留断裂带的中部,断距大。因而认为软沉积物变形构造受断距大小影响明显。

位于真②断层下降盘的黄珏油田、邵伯油田、真武油田的软沉积物变形构造发育程度也有不同,黄珏油田软沉积物变形构造单层厚为0.2~1.5m,厚度小,以液化扭曲变形、液化岩脉为主,变形程度较低。邵伯油田软沉积物变形构造单层厚为0.5~3.5m,厚度变化大,而且沉积构造以液化卷曲变形和自碎角砾岩为主,沉积物变形程度高。真武油田软沉积物变形构造发育程度与黄珏油田相似,软沉



图 2 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组软沉积物变形构造



积物变形构造单层厚为 0.3 ~ 1.2m,厚度小,以液化扭曲变形、液化岩脉为主。从真②断层的断距和断面倾角分析,黄珏油田和真武油田位于真②断层西部和中部的两个古构造相对隆起区,该区真②断层断距相对较小,断面倾角较大,而邵伯油田区域的真②断层不仅断距大,而且断面倾角大,并且在邵伯油田戴南组发育了近岸水下扇沉积,属于陡坡近物源沉积,而黄珏油田和真武油田戴南组发育扇三角洲沉积。因而软沉积物变形构造发育程度与真②断层的断距和断面倾角关系密切。

通过软沉积物变形构造平面分布规律总结,研究区软沉积物变形构造的发育频率与高邮凹陷深凹带的边界断层的断距和倾角有关。随着边界断层真②断层和汉留断层断距和断层面倾角变大,软沉积物变形构造出现的频率越高,发育程度越强烈,因而可以认为研究区变形构造的产生和分布受到古地形的控制。

前人研究认为产生软沉积物变形构造的应力主要有斜坡所产生的重力、不均一的负载力、由于密度倒置所引起的重力、水或其它流体所产的剪切力以及生物或化学作用所产生的应力等(Rodriguez-Pascua et al., 2000;王化爱等,2010;李勇等,2012),但斜坡所产生的重力是软沉积物变形构造产生的主要应力。从诱发因素上分析,自然界中能够触发软沉积物变形构造的因素很多,如地震、波浪、洪水、快速沉积以及地下水的运动等均可诱发软沉积物变形,但是地震是软沉积物变形构造的一种重要触发因素,因此可将触发因素分为地震和非地震两种类型。本次研究中没有将软沉积物变形构造按触发因素进行分类,研究区软沉积物变形构造主要是由于构造带边界断层的倾角大,导致研究区戴南组发育了大量的软沉积物变形构造,该类变形构造在一定程度上改变了原始储层的物性和连通性,对油气储

层具有一定的影响,因而有必要对研究区软沉积物变形构造的形成模式进行研究。

通过对研究区软沉积物变形构造的基本特征和分布规律分析,笔者等认为研究区软沉积物变形构造是在构造边界断层斜坡及斜坡下发育的,是受地形控制的沉积构造。通过参考国内外的软沉积物变形构造成因模式,提出了研究区的软沉积物变形构造沉积模式,研究区软沉积物变形构造主要发育于构造带边界断层形成的斜坡区附近,从剖面上可以分为上部浅水区、中部斜坡区和下部深水区三个区带(图 3)。

上部浅水区属于软沉积物未出现明显滑塌的区域,由于该段发育于相对海拔较高并且地层倾角较小的区域,当斜坡区沉积物发生滑塌时,该地区沉积物处于一种拉张应力环境下,多形成微断层、微裂缝等构造,并且形成的断层、裂缝等容易被上部沉积的细粒沉积物充填,导致该区的砂岩储层出现不连通现象,容易导致研究区发育的部分水下分流河道等条带状砂体出现间断,致使油藏储层出现不连片。中部斜坡区是软沉积物变形构造最发育的地区,发育了上述的同生微断层、液化岩脉、液化扭曲变形、砂枕构造、自碎角砾岩等各类软沉积物变形构造,该区的储层受改造程度大,物性变差,并在该区的中下部出现由于挤压作用形成的地层变厚现象或再次沉积现象,沉积段多发育自碎角砾岩、液化卷曲变形等沉积构造,斜坡区砂体虽然经受了液化变形等的改造,但是由于其自身粒度较粗,仍然可以作为较好的油气储层。下部深水区是沉积物滑脱后在断层底部趋于水平段再沉积或者向前挤压影响的区域,其原始沉积物多为泥质或者粉砂质的细粒沉积,经后期上部沉积物下滑力的挤压,形成液化变形为主的多种变形构造,其顶部沉积了从斜坡区滑塌下来的粗粒沉积,包括部分自碎角砾岩,但该处沉积物分选

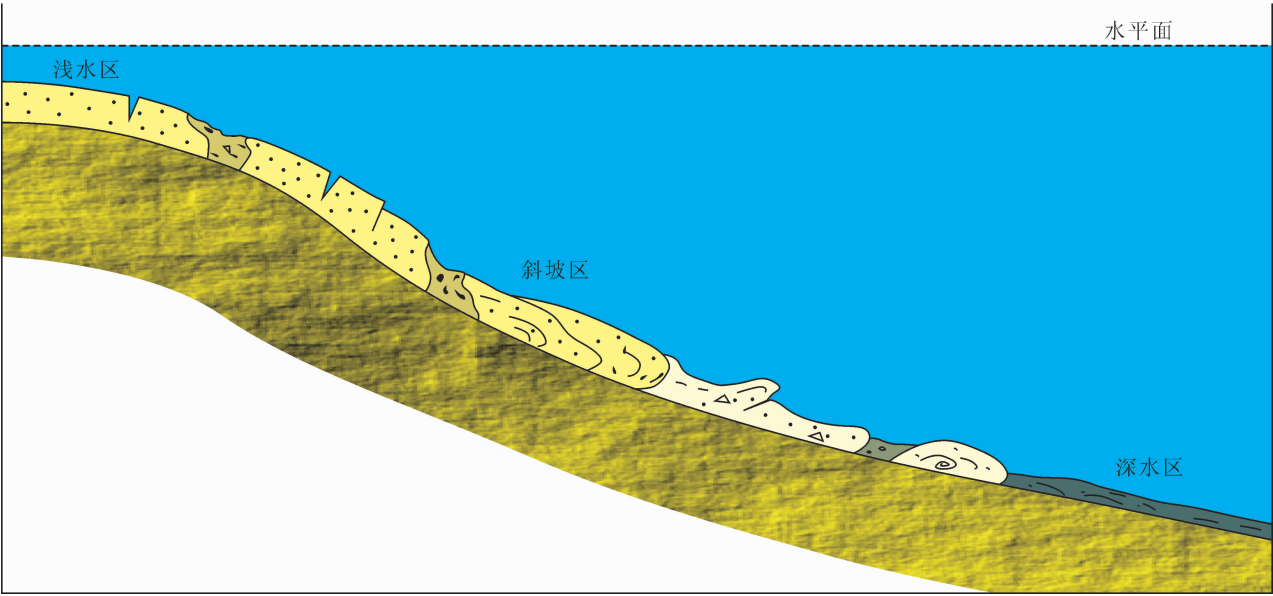


图3 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组软沉积物变形构造沉积模式图
Fig. 3 Depositional model chart of soft-sediment deformation structures of the Paleogene Dainan Formation in the Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

差,泥质含量高,导致最终形成的油气储层物性差,油气勘探潜力小。

4 结论

(1)高邮凹陷深凹带多个油田的岩芯观察中发现的主要软沉积物变形构造有同生微断层、液化岩脉、液化扭曲变形、砂枕构造、自碎角砾岩等,并分析了各种软沉积物变形构造具有的不同的应力环境和特征。

(2)研究区变形构造的产生和分布受到古地形的控制,软沉积物变形构造的发育频率与高邮凹陷深凹带的边界断层的坡度有关。随着边界断层真②断层和汉留断层断层面倾角变大,软沉积物变形构造出现的频率越高,发育程度越强烈,并且该类变形构造在一定程度上改变了原始储层的物性和连通性。

(3)研究区软沉积物变形构造主要发育于边界断层形成的斜坡区附近,从剖面上可以分为上部浅水区、中部斜坡区和下部深水区三个区带。上部浅水区属于软沉积物未出现明显滑塌的区域,中部斜坡区是滑塌作用最强烈,也是软沉积物变形构造最发育的地区,下部深水区是沉积物滑脱后在断层底部趋于水平段再沉积或者向前挤压影响的区域。

参 考 文 献 / References

邸继华,崔永北,陈世悦. 2009. 几种常见震积岩相标志在模拟实验中的识别. 沉积学报,27(6): 1131 ~ 1137.

高丽坤,林春明,姚玉来,张志萍,张霞,李艳丽,岳信东,刘玉瑞,马英俊. 2010. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组沉积相及沉积演化. 沉积学报, 28(4): 706 ~ 716.

李勇,钟建华,邵珠福,毛鑫. 2012. 软沉积变形构造的分类和形成机制研究. 地质论评,58(5): 829 ~ 838.

吕洪波,章雨旭,张绮玲,肖加飞. 2006. 地震相关的软沉积物构造变形及其在盆地演化中的意义. 地质学报,80(10): 1606.

吕洪波,王俊,张海春. 2011. 山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探. 地质学报,85(6): 938 ~ 946.

吕洪波,王俊,张海春. 2011. 山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探. 地质学报,85(6): 938 ~ 946.

吕洪波,张海春,王俊,张素菁,董晓朋,张星. 2012. 山东胶南灵山岛晚中生代浊积岩中发现巨大滑积岩块. 地质论评,58(1): 80 ~ 81.

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.

乔秀夫,宋天锐,高林志,彭阳,李海兵,高励. 1996. 中国震积岩的研究与展望. 地质论评. 42(4): 317 ~ 320.

乔秀夫,高林志,彭阳,李海兵. 2001. 古郯庐带沧浪铺阶地地震事件、层序及构造意义. 中国科学(D辑),31(11): 911 ~ 918.

乔秀夫,李海兵. 2008. 枕、球—枕构造:地层中的古地震记录. 地质论评,54(6): 721 ~ 730.

乔秀夫,郭宪璞. 2011. 新疆西南天山脚下侏罗统软沉积物变形研究. 地质论评,57(6): 761 ~ 769.

乔秀夫,郭宪璞,李海兵,苟宗海,苏德辰,唐哲民,张伟,杨光. 2012. 龙门山晚三叠世软沉积物变形与印支期构造运动. 地质学报, 86(1): 132 ~ 156.

王化爱,刘广春,杨玉平,孟玮. 2010. 蒙古国南贝尔凹陷泥质软沉积

变形构造特征及沉积序列. 油气地质与采收率,17(6):43~46.

姚玉来,林春明,高丽坤,刘玉瑞,马英俊,李艳丽,张霞,张志萍. 2010. 苏北盆地高邮凹陷深凹带东部古近系戴南组二段沉积相及沉积演化[J]. 沉积与特提斯地质,30(2):1~10.

杨剑萍,王辉,陈世悦,袁静,鄢继华,赵卫卫. 2004. 济阳拗陷古近系震积岩特征. 沉积学报,22(2):281~287.

曾允孚,夏文杰. 1986. 沉积岩石学. 北京:地质出版社,76~78.

张关龙,陈世悦,都继华,姜在兴,宋国奇,邱桂强. 2006. 三角洲前缘滑塌浊积体形成过程模拟. 沉积学报, 24(1):50~55.

赵澄林,刘孟慧. 1988. 湖相沉积岩中的同生变形构造及其地质意义. 岩石学报,4(4):14~24.

钟建华,王冠民,王夕宾,吴孔友,洪梅,李勇,倪晋仁. 2002. 黄河下游冰成滑塌与塌陷构造的研究. 沉积学报,20(2):261~266.

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

Lu Hongbo, Zhang Yuxu, Zhang Qiling, Xiao Jiafei. 2006. Earthquake-

related Tectonic Deformation of Soft-sediments and Its Constraints on Basin Tectonic Evolution. Acta Geologica Sinica, 80(5):724~732.

Rodriguez-Pascua M A, Calvo J P, Vicente G, Gómez-Gras D. 2000. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the late Miocene. Sedimentary Geology, 135:117~135.

Simms M J. 2007. Uniquely extensive soft-sediment deformation in the Rhaetian of the UK: Evidence for earthquake or impact. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 244(1/4):407~423.

Wheeler R L. 2002. Distinguishing Seismic from Nonseismic Soft-Sediment Structures: Criteria from Seismic-Hazard Analysis. In: Etensohn F R, Rast N, Brett C E. ed. Ancient Seismites, Geological Society of America Special Paper, 359:1~11.

Depositional Model and Characteristic of Soft-sediment
Deformation Structures of the Paleogene Dainan
Formation in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin

LIU Jinhua, WU Lifeng, QIAO Li, SUN Xiuhui, SUN Xiaoqing
Geology Research Institute of Jiangsu Oilfield, Sinopec, Yangzhou, Jiangsu, 225012

Abstract: Soft-sediment deformation Structure is named syndepositional deformation structure, and the developmental feature, distribution rule and depositional model are important for the research of reservoir. After the observation of the core in the work area, we found the microfault, liquid dike, liquid twist deformation, ellipsoidal structure, autoclastic breccia, and so on. And we analyzed the stress environment and characteristic of the soft-sediment deformation structures. By the analysis of the distribution of the soft-sediment deformation structures, the developmental frequency and gradation are related with the angle of dip of the Zhen② fault and Hanliu fault, the distribution of the soft-sediment deformation structures is controlled by the ancient landform. The physical property and communication of the reservoir are changed by the soft-sediment deformation structures. On the base of the depositional model of the soft-sediment deformation structures by predecessors, we set up the new depositional model of the soft-sediment deformation structures of Gaoyou Sag, the soft-sediment deformation structures of work area are mainly developed near the ramp region of boundary fault, and it is departed into 3 parts, the upper shallow-water region, middle ramp region, bottom deep water region.

Key words: soft-sediment deformation structure; microfault; liquefied deformation Structure; depositional model; Gaoyou Sag; north Jiangsu Basin