

渤海西南海域寒武系崮山组软沉积物 变形构造特征及地质意义

叶涛, 韦阿娟, 高坤顺, 孙哲, 郭颖, 李飞

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津, 300459

内容提要:首次在渤海海域下古生界寒武系崮山组碳酸盐岩中识别出了软沉积物变形构造。通过对钻井岩芯的详细观察与描述, 识别出了液化底劈构造、液化泥晶脉、液化角砾岩等软沉积物变形构造; 根据研究区变形特征, 建立了其垂向演化序列, 该区软沉积物变形构造可分为两段, 在剖面上自下而上均表现为液化泥晶脉、液化底劈带、液化角砾岩带、层内阶梯状断层带的渐变序列。研究认为, 该区软沉积物变形构造系崮山沉积期古地震作用的产物, 本次新发现的古地震事件可能与古郯庐断裂带的活动有关, 是中朝地台裂解为华北板块与胶辽板块的响应。

关键词:渤海海域; 下古生界; 崮山组; 软沉积物变形; 古郯庐断裂带

软沉积物变形 (Soft-sediment deformation) 系指尚未完全固结或半固结的沉积物, 在内力或外力作用下, 沉积物颗粒间剪切力降低致使沉积物发生结构与层理变形 (Owen et al., 2011; Oksana et al., 2016; Kyoungtao et al., 2017)。这些软沉积物变形构造包括“载荷构造”或“负载构造”, 沉积物在斜坡上所产生的“重力滑动构造”、“重力滑塌构造”等等 (冯增昭, 2017; 冯增昭等, 2017)。由于软沉积物变形需要一种瞬时、突发、剧变的动力触发, 地震通常作为其成因的解释 (武振杰等, 2009; 张斌等, 2011; 袁静, 2005; 杨文涛等, 2017; 杜远生等, 2017)。国内外大量学者报道了与古地震事件有关的软沉积物变形实例 (梁定益等, 1994; Rodriguez et al., 2000; 包佳凤等, 2002; Sebastien et al., 2008; Zeev et al., 2010), 并建立了碳酸盐岩与碎屑岩震积岩 (由地震引起的具软沉积物变形构造的岩层) 垂向变形序列 (宋天锐, 1988; 乔秀夫等, 2001; 杨剑萍等, 2014), 极大的指导了古构造与古环境的研究。

郯庐断裂带是中国东部最大的活动断裂带, 其形成时间以及活动期次一直是科学界争议的热点问题 (余一欣等, 2017)。与区域构造相关的软沉积物变形是区域构造运动的响应, 乔秀夫等认为华北周缘露头的软沉积物变形构造多为古地震活动的产物, 通过总结华北地台震旦系—早古生代地震节律, 认为其是古郯庐断裂带活动所控制的 (乔秀夫等,

1997)。田洪水等在鲁中寒武系馒头组中识别出软沉积物变形构造, 亦认为其为古地震活动的响应, 且推定该期古地震事件是早寒武世末郯庐地震带强烈活动的结果 (田洪水等, 2003; 郭少婷等, 2015)。刘磊等近年来在郯庐断裂带辽东湾段古近系中发现了多期的软沉积物变形构造, 认为其与沙三期、沙一期、沙二期以及东营期的郯庐断裂带强烈活动有关 (刘磊等, 2015)。然而, 截止目前, 关于渤海海域内古生代软沉积物变形构造的研究还处于空白。

本文以渤海海域钻井资料为基础, 详细描述了CFD30-1-A井寒武系中发现的软沉积物变形特征, 建立了其垂向发育序列, 并探讨了其诱发机制。一方面所发现的软沉积物变形构造在郯庐断裂带渤海海域内尚属首次, 是对野外露头资料的有效补充; 另一方面, 其发育层位 (崮山组) 不完全隶属于乔秀夫等 (1997) 总结的古地震节律之中, 可能对华北地台震旦—早古生代软沉积物变形垂向发育期次具有一定的完善作用。

1 地质背景

渤海海域位于渤海湾盆地东部, 是中国海域油气最为富集的盆地之一, 主体位于东经 117°~122°和北纬 37°~42°, 地域涉及辽宁、大连、秦皇岛、歧口和莱州等市, 东界为胶辽隆起, 西、南、北界分别为黄骅拗陷、济阳拗陷以及下辽河拗陷向海域的延伸

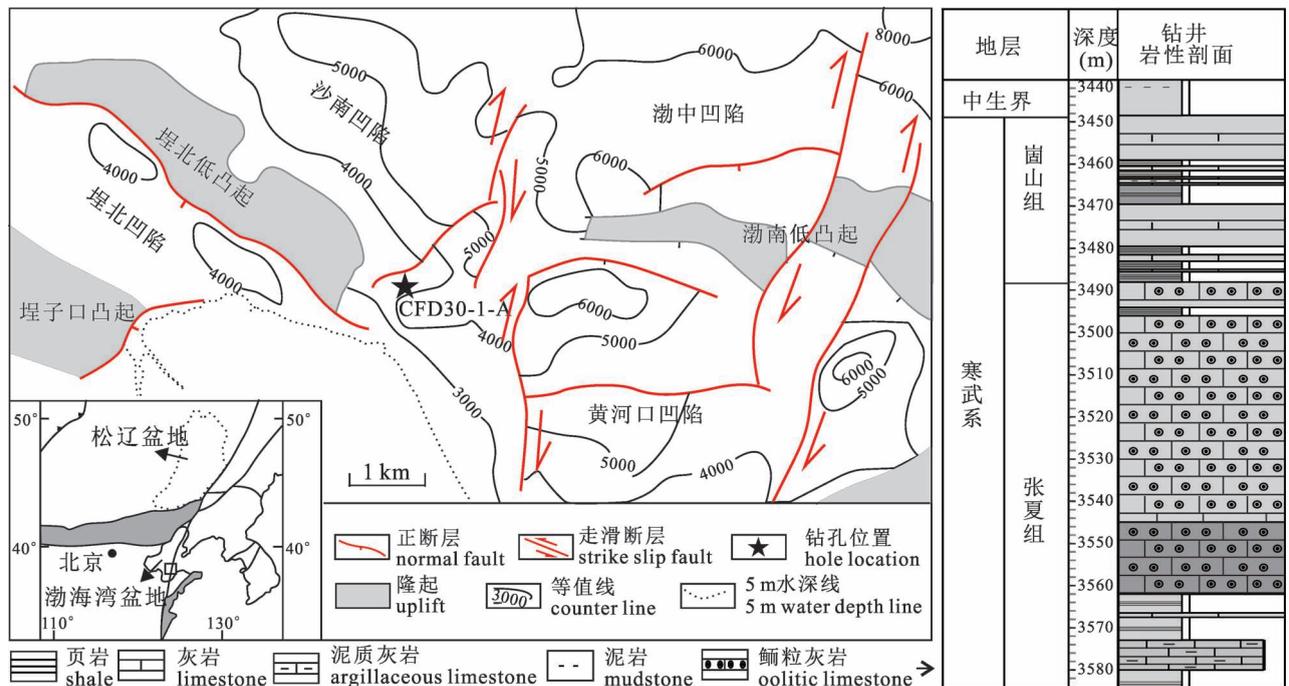


图1 渤海西南部海域构造纲要图及地层柱状图

Fig. 1 The structural outline of the southwest Bohai Sea and the distribution of the borehole

(王文庆等,2012)。其东部受中国东部最大的走滑断层郯庐断裂带所控制(王应斌等,2013),郯庐断裂带内火山活动与地震事件极其频繁(叶涛等,2016)。研究区郯庐断裂带以NE向展布为主,与NW向的张蓬断裂系呈现出共轭的特征。渤海西南部海域郯庐断裂带可进一步划分为西支、中支以及东支,大量学者认为在中生代郯庐断裂带以左旋走滑为主,而到新生代则演化为右旋走滑(张岳桥等,2008;黄雷等,2012),但具体的转变时间尚存在较大的争议。

取芯井 CFD30-1-A 井构造上位于渤中凹陷、沙南凹陷、埕北凹陷以及黄河口凹陷的结合部(图1),同时处于NE向郯庐断裂带西支与NW向张蓬断裂带(埕北断层)相交处,构造位置较为特殊。钻井揭示下古生界岩性以灰岩与泥页岩互层为主,从钻井岩性剖面上,可划分为上下两段,上部3448~3489 m段具有竹叶状灰岩与页岩互层特征;而3489~3602 m为厚层鲕粒灰岩夹薄层泥页岩(图1)。根据华北地台下古生界不同地层岩性组合特征以及渤海潜山已钻井的地层特征,通过井间对比,证实上段为寒武系崮山组,与区域上的风暴沉积砾屑灰岩与崮山组页岩组合吻合,厚层鲕粒灰岩亦可有力证实下段为张夏组。取芯段为3454~3459 m,共5 m,根据地层

分组特征,取芯段位于崮山组。

2 软沉积物变形构造特征

2.1 软沉积物变形构造类型

对软沉积物变形构造的识别,不同学者总结出了大量的识别标志。根据出现的特征差异,可划分为原地系统与异地系统(乔秀夫等,2001)。原地系统的主要鉴别标志有液化砂岩脉、液化泥晶脉、火焰构造、振动液化卷曲、层内阶梯状断层、液化角砾岩、震裂岩等等(鄢继华等,2009),而异地系统则包括浊积岩、碎屑流灰岩等(乔秀夫等,2001),研究区软沉积物变形具有典型的原地系统特征。

(1)液化底劈构造。研究区发育液化底劈构造,根据剖面形态特征可划分为舌状平顶型(图2a、b)与柱状尖顶型(图2c、d),岩芯上垂向延伸长度较小,介于1~2 cm;液化底劈侵入体的底部与液化灰岩层相连,与围岩界限清晰,具有下宽上窄的特征,下部宽度在2~5 cm,上部宽度在1~3 cm,部分液化灰岩层向上刺穿围岩,与上部液化层沟通,形成“工”字型构造(图2d(5))。

(2)碳酸盐岩灰泥火山。研究区同时发育碳酸盐岩灰泥火山,灰泥火山下部与液化灰泥相连,灰泥火山内部见纵向纹线,是液化碳酸盐岩灰泥流动的

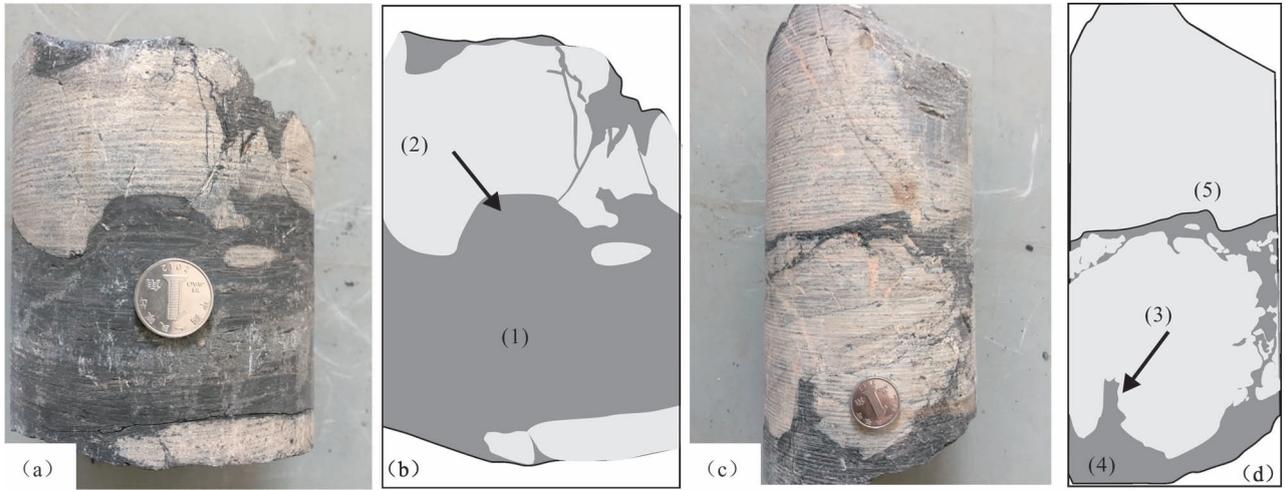


图2 渤海西南海域 CFD30-1-A 井液化底劈构造

Fig. 2 The liquefied diapir structures of CFD30-1-A in the southern Bohai Sea

(a)、(c)液化底劈构造;(b)、(d)照片解释;其中(1)、(4)为液化灰岩,后期发生白云岩化,(2)、(3)为液化底劈构造,(5)为上部液化层
 (a), (c)liquefied diapir structure;(b), (d)photo interpretation:(1), (4)are liquefied limestone, which dolomitization later,
 (2), (3) are liquefied diapir structure, (5) are upper liquefied layer

结果,此类纹线与田洪水等在早寒武世初期沂沭断裂带内发现的碳酸盐岩灰泥火山内部纹线类似(田洪水等,2003)。灰泥火山与围岩界限清楚,下部与液化灰岩相连,灰泥火山顶部见交叉状裂缝,可能与应力释放后塌陷有关(图 3a、b),另外,灰泥火山在喷出过程中,可在喷发路径上形成多个分支,形成灰泥侵入脉(图 3c、d)。

(3)液化泥晶脉与液化角砾岩。液化碳酸盐岩脉在研究区可表现为规则状与不规则状,在液化泥晶脉发育稀疏区,主要呈柱状特征(图 4a、b),在泥晶脉发育较为密集区,可同时出现液化角砾岩(图 4c、d),液化角砾岩系在液化作用过程中,液化的脉体将围岩层沿层刺断,形成棱角状的角砾,此类角砾一般未发生搬运,因而棱角明显,同时,部分角砾可

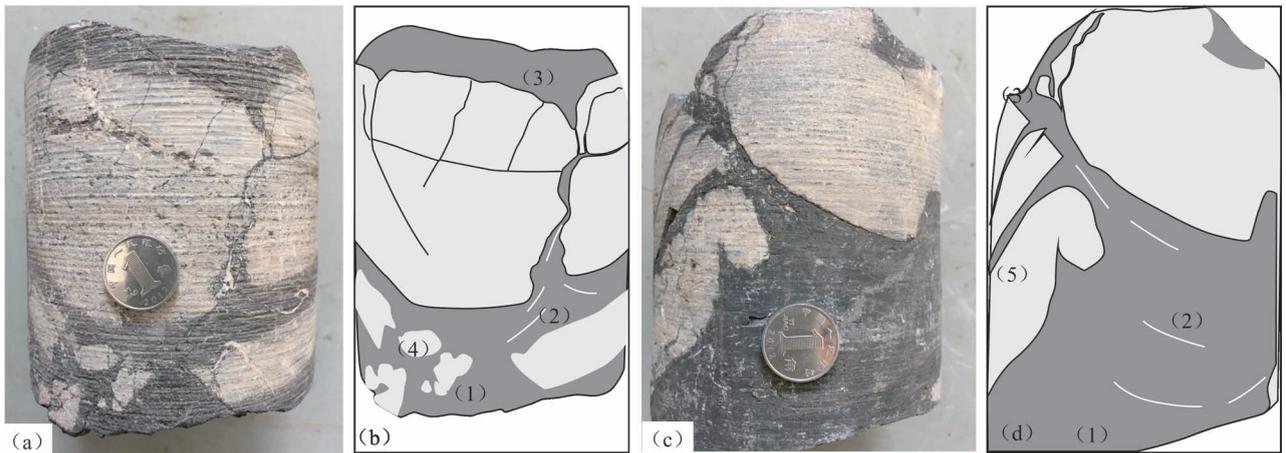


图3 渤海西南海域 CFD30-1-A 井碳酸盐岩灰泥火山

Fig. 3 The liquefied carbonate volcanos of CFD30-1-A in the southern Bohai Sea

(a)、(c)碳酸盐岩灰泥火山;(b)、(d)照片解释;其中(1)为液化灰岩,后期发生白云岩化,(2)为液化灰岩上涌流线,(3)为灰泥火山,灰泥白云岩化,(4)为角砾,(5)为未喷出地表的液化底劈构造

(a), (c)are liquefied carbonate volcano;(b), (d)photo interpretation:(1) are liquefied limestone, which dolomitization later, (2)are upflow line of liquefied limestone, (3)are liquefied carbonate volcano, which dolomitization later, (4) are breccia, (5) are liquefied diapir structure which didn't ejected from the surface

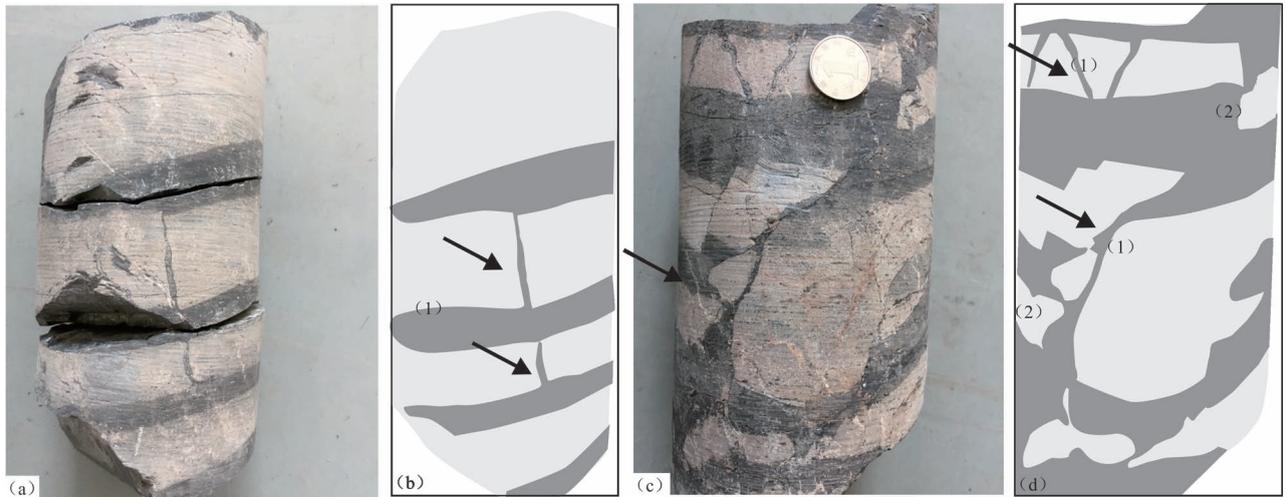


图4 渤海西南海域 CFD30-1-A 井碳酸盐岩液化泥晶脉与液化角砾岩

Fig. 4 The liquefied micrite-vein and liquefied breccias of CFD30-1-A in the southern Bohai Sea

(a)、(c)碳酸盐岩液化泥晶脉;(b)、(d)照片解释:其中(1)为液化泥晶脉,后期发生白云岩化,(2)为液化角砾,系液化脉切割所致
(a),(c)are liquefied micrite-vein;(b),(d)photo interpretation:(1)are liquefied micrite-vein, which dolomitization later,
(2)are liquefied breccias, which were cut buy liquefied micrite-vein

以拼接恢复原始的沉积面貌。另外,液化角砾间往往无渗流粉砂或风化形成的黏土质,故而可较好的与风化角砾区分(图4c、d)。

研究区液化泥晶脉的成分与围岩具有一定的差异,但均为碳酸盐岩。围岩(图4岩芯中浅色部分)以粉泥晶生屑云质灰岩(含大量生物碎屑)与泥晶生屑云岩为主,均含有较高的生物碎屑含量(图5a、b),而液化泥晶脉(图4岩芯中深色部分)中则主要为粉晶白云岩,不含生物碎屑,且白云岩晶粒较为均匀,具有相对等粒的特征(图5c、d)。乔秀夫等曾指出,脉的成分往往与围岩一致,但液化后进行了纯化,较围岩干净,且具有等粒化的趋势(乔秀夫等,2001)。推测研究区早期沉积物为生屑含量较高的泥晶灰岩,在外力作用下发生液化,液化过程中沉积物发生分异,液化泥晶脉趋于纯化,以泥晶灰岩为主,而生物碎屑则主要残留于围岩中,后期液化泥晶脉与围岩共同发生白云石化作用,白云岩化作用与液化过程无关,是后期成岩作用的结果。

(4)层内断层。层内断层多由岩层内部一组倾向相同的正断层组成,且断层面一般较陡,往往仅分布于地层内部,不会切穿地层顶部(图6)。该类断层可单独发育,也可平行排列呈阶梯状(朱萌等,2011),研究区此类断层断距多为1~3 cm,断面总长度为3~8 cm,沿断层见液化泥晶物质充填,在部分泥晶充填物中可见围岩角砾。此类角砾具有较强的

棱角,推测为断裂过程中围岩脱落所致(图6b、d)。大量学者研究认为,该类断层多分布于一期软沉积物变形序列的顶部,是软沉积物液化排水后期沉降过程中体积缩小拗陷的结果(李元昊等,2008)。

2.2 软沉积物变形垂向序列

研究区软沉积物变形构造在垂向上表现出一定的序次性,自下而上呈现出规律性变化。根据软沉积物变形构造的强度,可将该井段变形特征分成两段,下段厚度相对较小约为36 cm,上段厚度较大,为98 cm。

下段可以进一步划分为三个亚段,下亚段为厚层生屑灰质云岩,总厚度约12 cm,与底部砾屑灰岩成不整合接触,生屑灰质云岩中见一角砾,角砾长轴直径约8 cm;中亚段厚度为8 cm,液化层发育,一方面液化层内见大量液化底劈构造(火焰构造),主要为黑灰色液化碳酸盐岩向上部围岩地层中发生穿插,一部分终止于围岩中形成火焰构造,另一部分刺穿围岩形成液化碳酸盐岩泥晶脉,同时在较厚层的液化层中见大量的围岩角砾,角砾多呈棱角状,部分角砾间可拼接,为液化脉切割所致;上亚段厚度最大,厚约16 cm,主要表现为层内阶梯状断层,部分断层未将围岩层切断,液化层中见大量的围岩角砾,呈棱角状,系断层发育过程中围岩层破碎时掉落液化层中所致(图7)。

上段下部亚段同样发育液化底劈构造,但发育

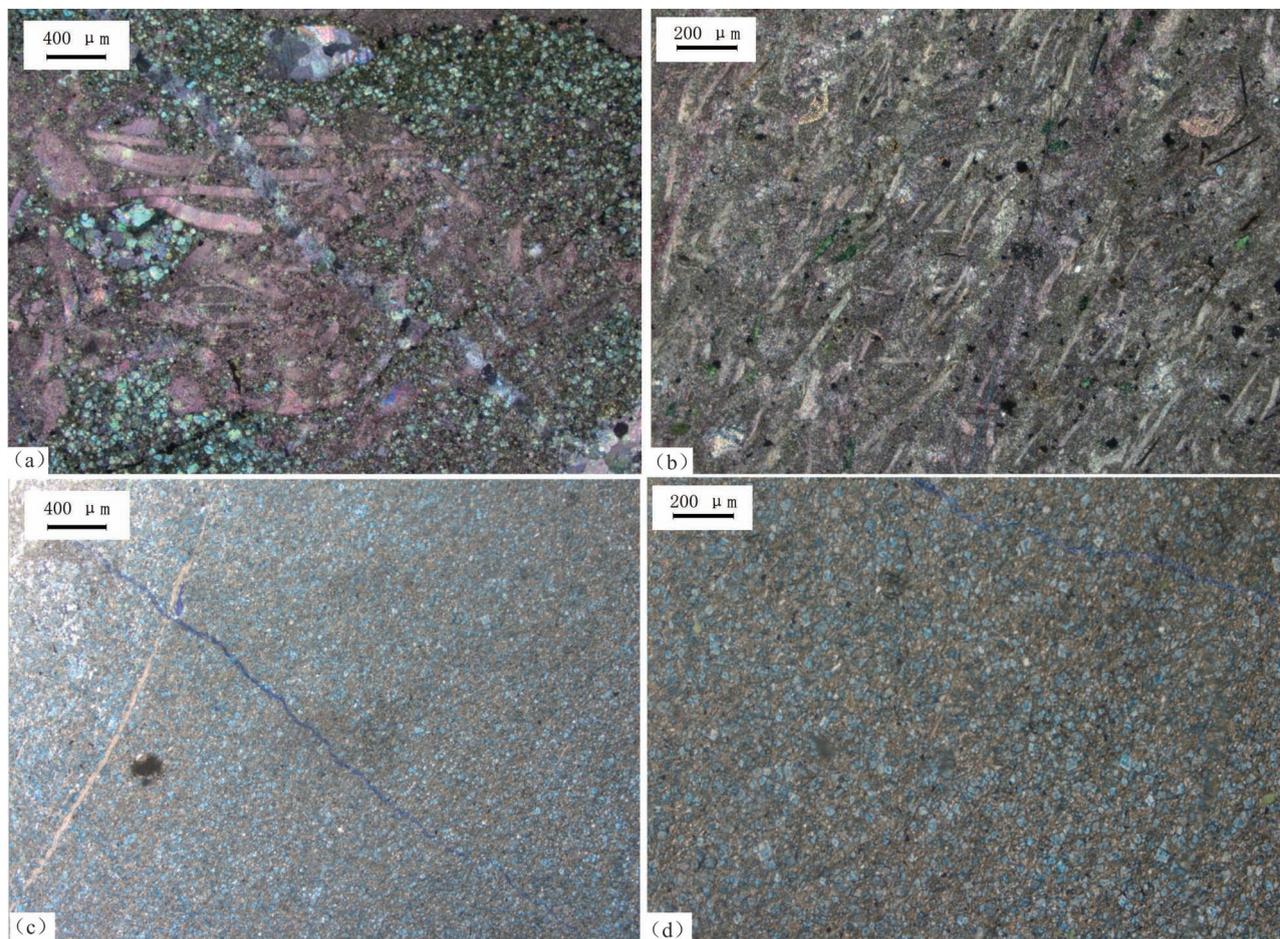


图5 渤海西南海域 CFD30-1-A 井液化泥晶脉与围岩岩性差异特征

Fig. 5 Different characteristic of liquefied micrite-vein and surrounding rocks under the microscope in CFD30-1-A

(a) 3458.69 m 围岩, 粉泥晶生屑云质灰岩, 见大量生物碎屑, 生物碎屑主要为三叶虫; (b) 3456.16 m 围岩, 泥晶生屑云岩, 见大量生物碎屑, 生物碎屑主要为三叶虫; (c) 3457.05 m 液化泥晶脉体, 粉晶白云岩, 岩石成分主要为铁白云石, 铁白云石主要为粉晶状; (d) 3457.05 m liquefied micrite-vein, 粉晶白云岩, 岩石成分主要为铁白云石, 铁白云石主要为粉晶状

(a) 3458.69 m wall-rock——silty crystal bioclastic dolomitic limestone, in which a large number of bioclasts exist, and bioclasts are mainly three leaf insects; (b) 3456.16 m wall-rock——argillaceous clastic dolomite, in which a large number of bioclasts exist, and bioclasts are mainly three leaf insects; (c) 3457.05 m liquefied micrite-vein, crystal powder dolomite, the main composition of the rock is iron dolomite, and the structure is crystal powder.; (d) 3457.05 m liquefied micrite-vein, crystal powder dolomite, the main composition of the rock is iron dolomite, and the structure is crystal powder

程度远不如下部,但不排除在岩芯缺失段中发育;但上段中层内阶梯状断层更为发育,且断距要大于下段,多数围岩层均被切断,同时断层的密度要大于下段,同样棱角状围岩角砾在该段中发育;不同的是在该段的顶部仍发现了液化火焰构造,液化层中有椭圆的围岩角砾,分析可能是在地震后期沉积物沉陷过程中,由于液化层塑性强,故其以塑性变形的形式取代了地裂缝等特征,此时,附近的刚性角砾陷落于液化层中,故有此特征(图7)。

另外值得注意的是,软沉积物变形的上段及下段之间并非未发生液化,只是典型的软沉积变形构

造较少,在该段内,可见液化层与围岩互层分布,但仅在其中见一小型液化脉,大量的液化层呈平行状展布(图7),表示该段虽然发生了液化作用,但液化层的变形作用较弱,可能与该段准同生期地震强度减弱有关。

3 讨论

3.1 软沉积物变形构造成因

根据是否受古地震作用控制,可以将软沉积物变形构造划分为地震成因(严兆彬等,2005;赵灿等,2012;石成龙等,2016)以及非地震成因(周琦

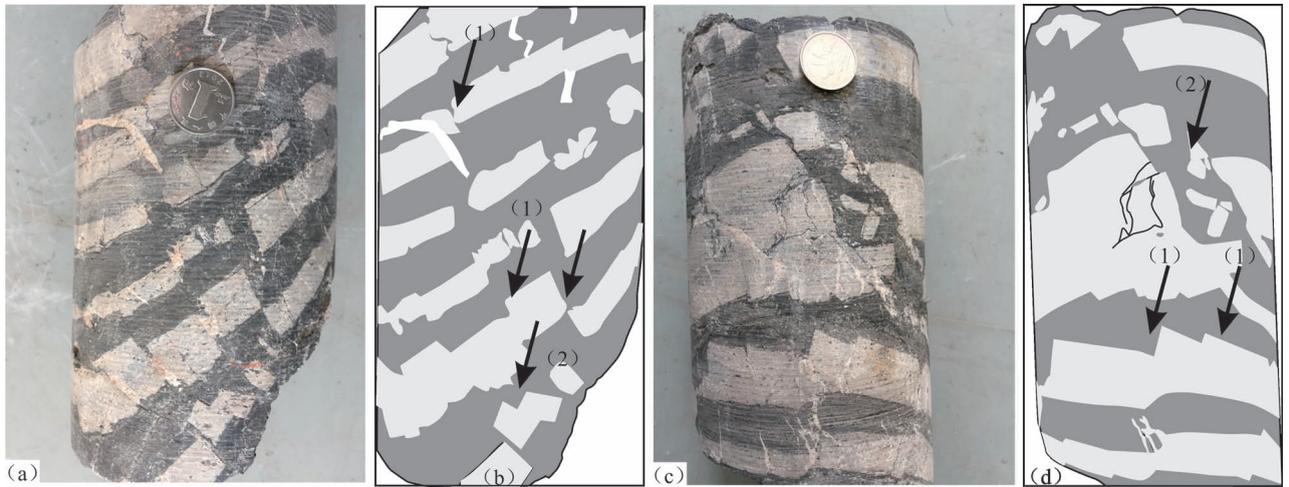


图 6 渤海西南海域 CFD30-1-A 井碳酸盐岩层内断层

Fig. 6 The step micro-faults of CFD30-1-A in the southern Bohai Sea

(a)、(c) 碳酸盐岩层内阶梯状断层；(b)、(d) 照片解释：其中 (1) 为层内阶梯状断层，(2) 为围岩脱落棱角状角砾

(a)、(c) are step micro-faults in carbonate ; (b)、(d) photo interpretation : (1) are step micro-faults, (2) are breccia drop from surrounding rock

等,2007;Morretti et al., 2011), 而地震成因的软沉积物变形构造根据地震发生的时间以及沉积物固结

状态,又可进一步划分为同生软沉积物变形以及准同生软沉积物变形两亚类(表 1)。

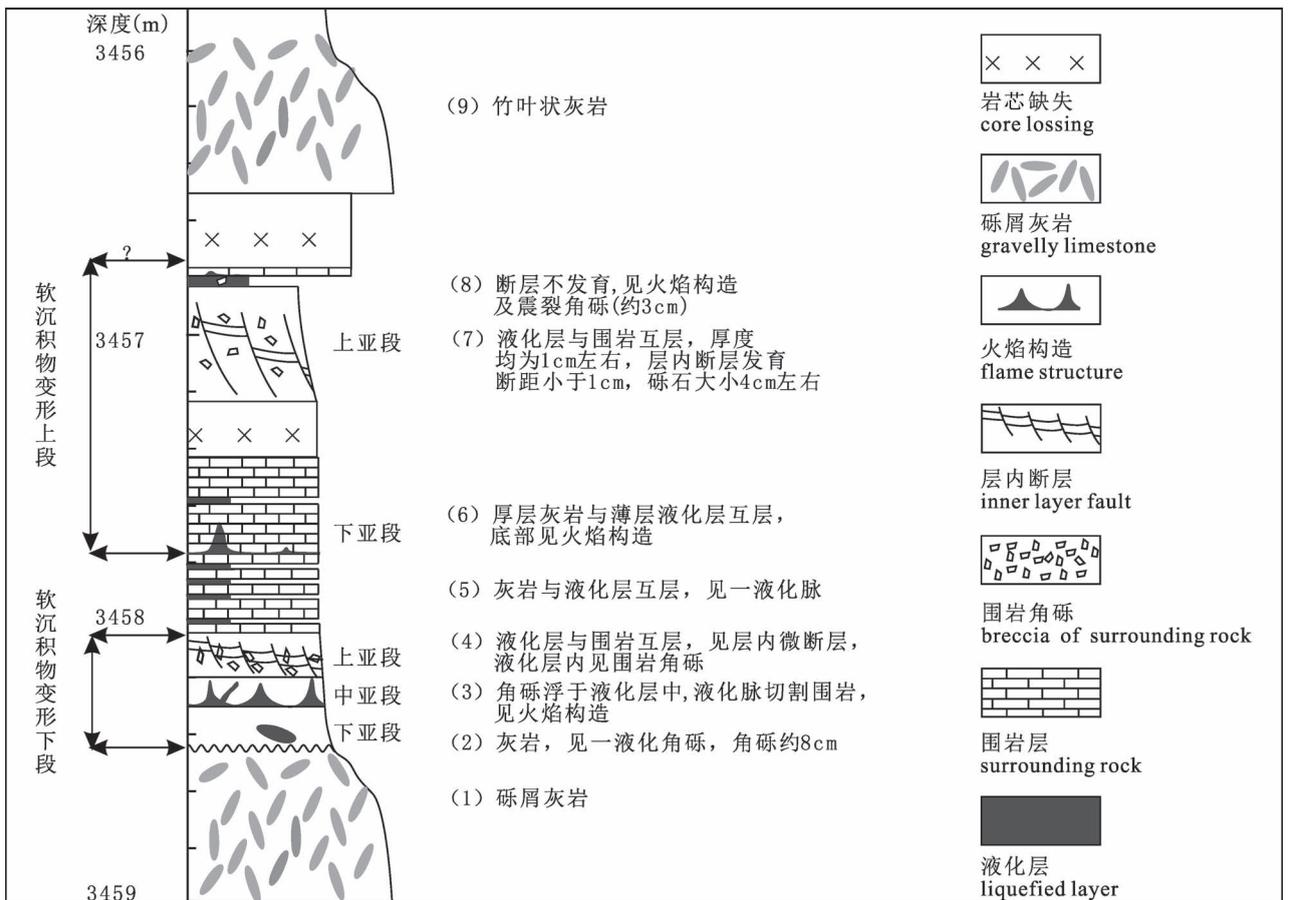


图 7 渤海西南海域 CFD30-1-A 井软沉积物变形垂向序列

Fig. 7 Vertical series of soft- sediment deformation structures in CFD30-1-A

表 1 软沉积物变形构造成因类型及典型标志组合(据杜远生等,2017 修改)

Table 1 Genetic type and typical combination of soft sediment deformation (modified from Du Yuansheng et al., 2017&)

软沉积物变形成因类型		典型变形构造
地震成因	同生软沉积物变形 准同生软沉积物变形	地裂缝、同沉积断层、褶皱、震碎角砾岩 负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造、枕状层
非地震成因	冰融作用 天然气泄露 水力破裂 重力滑塌 液化作用	冰融滑塌(不协调褶皱) 底劈构造、泥火山、不协调褶皱、气泡构造 底劈构造、水力破裂角砾岩 岩崩、滑坡、滑塌、泥石流、震浊流沉积 液化脉、沙火山、泄水构造、液化角砾岩、液化卷曲变形构造等

尽管地震成因与非地震成因的软沉积物变形均可使原始沉积的岩石发生液化而形成底劈构造、液化脉等变形构造,但与非地震成因不同,地震成因的软沉积物变形构造中往往为出现地裂缝、震碎角砾岩等典型的沉积构造,尤其是在同生变形过程中,层内断层是地震岩的典型标志(表 1)。如前所述,研究区软沉积物变形中见大量的层内断层、液化角砾岩,证明研究区软沉积物变形构造可能是古地震事件的产物。

同时,软沉积物变形的组合亦可证实其具有地震岩的特征。乔秀夫等(乔秀夫等,2001)建立了碳酸盐岩的地震软沉积物变形序列,认为,在垂向上可发育 A、B、C 三段,其中 A 段为液化泥晶脉发育段,代表地震高潮阶段;B 段以发育液化角砾岩,液化变形构造为主,为地震高潮阶段—衰减过渡阶段;C 段则主要为地裂缝以及层内断层,是地震活动停止的标志。通过对比研究区软沉积物变形的垂向特征与标准的碳酸盐岩地震软沉积物变形序列,发现两者具有较好的吻合关系。图 7 中两段软沉积物变形中均具有自下部的液化泥晶脉,液化底劈构造向顶部的层内阶梯状断层有序演化的特征,也可证实其具有典型的地震软沉积物变形构造的特征。

3.2 古地震时间

软沉积物变形构造的形成时间往往与其赋存的地层时代相同或略晚于地层时代。这是由于如若地层沉积时间过久,成岩作用较强,原生沉积地层水大量排除之后,往往难以发生液化。研究区软沉积物变形构造具有典型的同生变形构造,表明该变形形成于沉积物沉积后弱固结—半固结时期,地层的时代可以代表古地震的发育时期。

3.3 诱发机制

地震岩是古地震的沉积记录,不同学者的研究均表明地震岩的诱发多受大型断层控制(严兆彬等,2005;田洪水等,2006;杨剑萍等,2008;朱萌等,

2011)。研究区主要的大型断层为东侧的郯庐断裂带以及西侧的埕北断裂带,通过油区三维地震资料揭示埕北断裂带形成时间为印支期,表明在崮山组沉积期埕北断裂带还未形成,因此推测该区地震岩可能与古郯庐的活动有关。

事实上,前人在郯庐断裂带内确已发现了大量震旦—早古生代时期的古地震事件,如张邦花等(2012)分别在济南馒头山早寒武世地层以及山东临朐中奥陶统下部中发现了古地震事件,均认为其是古郯庐断裂带构造活动的响应;乔秀夫等(1997)详细总结了华北地台震旦—早古生代地震节律,共识别出 24 个地震岩组,在地层柱中代表 11 个地震活跃期,且认为在 650~500 Ma 中有两个地震活跃期,该期的古地震事件主要分布于胶辽徐淮地区,并将该带定义为古郯庐带,而本次所发现的地震岩在空间位置上正置于该带内(图 8),且在时间上也位于 650~500 Ma,这种时间与空间上的有效匹配进一步增加了其为古郯庐活动响应的可能性。在该活动带内,650~500 Ma 不仅地震岩发育,基性侵入体亦发育,且侵入岩位于该时期地震岩之间,而不进入更新的层位,这种地震事件、基性侵入岩体共同的出现与超大陆的裂解一致,表明此时古郯庐已经开始孕育,其将中朝地台内部裂开形成华北地台以及胶辽地台(乔秀夫等,1997)。

值得注意的是,乔秀夫等总结的地震节律之中,650~500 Ma 地震岩主要发育层位为大林子组与张夏组,而本次发现的地震岩则位于张夏组之上的崮山组之内,这可能与断裂带活动的迁移性有关,在大量的断裂带研究实例中均证实,同一断裂的活动以及地震事件具有时空差异性及平面迁移性(冯希杰等,2004;丁国瑜,1989),这可能是研究区地震岩并非完全与乔秀夫总结的地震节律吻合的主要原因。其实苏德辰等也在华北寒武系崮山组中发现了地震岩

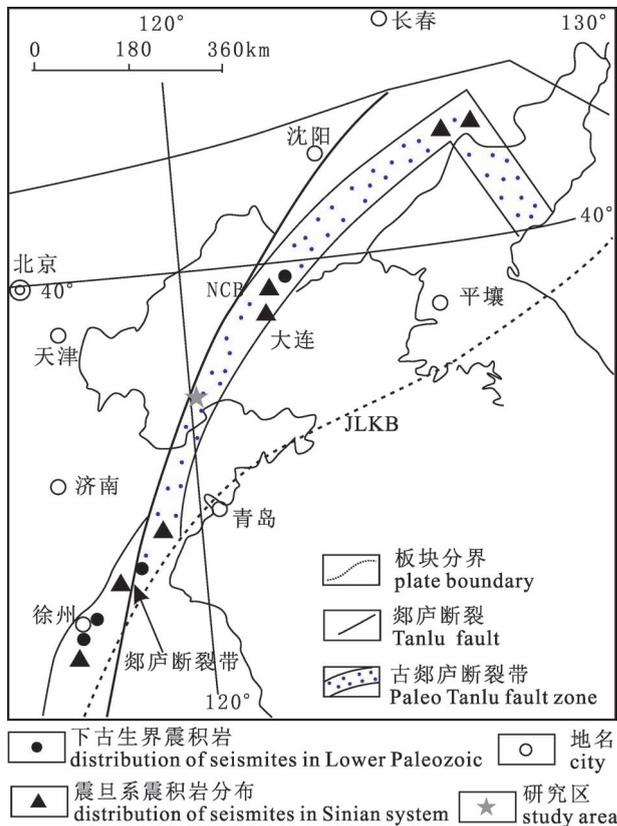


图8 古郯庐地震带区域位置及已发现古地震事件位置

Fig. 8 Location of the palaeo-Tanlu seismic belt and the distribution of the seismite

(苏德辰等,2013),证明该时期的地震事件可能具有普遍性。

研究区地震岩的发现在渤海海域内古生界中尚属首次,其是对古郯庐断裂带古地震事件论证资料的有效补充;另一方面,尽管本次发现的古地震事件时间隶属于乔秀夫等提出的650~500 Ma时间跨度内,但是却并非完全与其总结的地震节律吻合(不属于大林子组与张夏组),这也说明古郯庐的活动在地质历史时期中可能具有迁移性,而软沉积物变形构造的分布层位可能要多于目前总结的24个地震岩组,这也值得地质工作者在今后的工作中进行留意。

4 结论

(1)首次在渤海南部海域下古生界崮山组地层中发现了软沉积物变形构造。该软沉积物变形构造具有上下两段,自下而上均具有液化泥晶脉—液化底劈带、液化角砾岩带、层内阶梯状断层带的渐变序列,两段之间沉积物发生了液化,但未见典型的软沉积物变形构造,可能与古地震活动强度减弱有关。

(2)研究区软沉积物变形构造具有典型的地震作用驱动特征,并形成于崮山组沉积期。其在空间上隶属于乔秀夫所述的古郯庐地震带之内,可能受控于古郯庐断裂的活动,指示中朝地台裂解为华北地台与胶辽地台的过程。该地震岩的发现一方面丰富了古郯庐断裂带的海域资料,另外也表明古郯庐的活动在地质历史时期中可能具有复杂性,软沉积物变形构造的分布层位可能要多于目前总结的24个地震岩组。

致谢:感谢审稿专家和责任编辑提出的宝贵意见和建议,在此深表谢意。

参考文献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)
- 包佳凤, 赵云江, 王承平, 王伟, 杨仕潘, 张坤, 马进华. 2002. 滇西保山金鸡地区三叠系上统大水塘组震积岩的发现及意义. 沉积学报, 30(3): 490~500.
- 陈俊飞, 张昌民, 朱锐, 杨波, 晏奇, 卢晓林, 朱爱国. 2017. 软沉积物滑塌变形物理模拟及变形机理分析. 古地理学报, 19(1): 139~146.
- 丁国瑜. 1989. 第四纪断层上断裂活动的群集及迁移现象. 第四纪研究, 1(1): 36~47.
- 杜远生, 彭冰霞, 韩欣. 2005. 广西北海涠洲岛晚更新世火山活动引起的地震同沉积变形构造. 沉积学报, 23(2): 203~209.
- 杜远生, 余文超. 2017. 地震和非地震引发的软沉积物变形. 古地理学报, 19(1): 65~73.
- 冯希杰, 戴王强. 2004. 渭河盆地断层活动的横向迁移. 地震学报, 26(2): 174~182.
- 冯增昭. 2017. 一次成功的专题研讨会: "多成因的软沉积物变形构造及震积岩". 古地理学报, 19(1): 1~6.
- 冯增昭, 鲍志东, 郑秀娟, 王媛. 2017. 中国软沉积物变形构造及地震岩研究简评. 古地理学报, 19(1): 7~13.
- 郭少婷, 童亨茂. 2015. 渤海湾盆地秦皇岛探区两期应力场演化的断裂响应特征. 地质论评, 61(z1): 639~640.
- 黄雷, 王应斌, 武强, 王强. 2012. 渤海湾盆地莱州湾凹陷新生代盆地演化. 地质学报, 86(6): 867~876.
- 李元昊, 刘池洋, 王秀娟. 2008. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组震积岩特征研究. 沉积学报, 26(5): 772~780.
- 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.
- 刘磊, 陈洪德, 徐长贵, 钟怡江, 吴奎. 2015. 辽东湾古近系震积岩特征及其时空分布规律研究. 沉积学报, 33(5): 919~922.
- 乔秀夫, 高林志, 彭阳. 2001. 古郯庐带新元古界—灾变层序生物. 北京: 地质出版社: 20~21.
- 乔秀夫, 李海兵, 高林志. 1997. 华北地台震旦系—早古生代地震节律. 地学前缘, 4(3): 155~160.
- 石成龙, 刘典波, 崔一龙, 张传恒, 邱元喆. 2016. 华北串岭组软沉积物变形构造及其构造古地理意义. 地质论评, 62(1): 37~53.
- 宋天锐. 1988. 北京十三陵前寒武纪碳酸盐岩地层中的一套可能的地震—海啸序列. 科学通报, 33(8): 609~611.
- 苏德辰, 孙爱萍, 郑桂森, 吕金波, 郭荣涛. 2013. 北京西山寒武系滑塌构造的初步研究. 地质学报, 87(8): 1067~1075.
- 田洪水, 万中杰, 王华林. 2003. 鲁中寒武系馒头组震积岩的发现及初

- 步研究. 地质论评, 49(2): 121~132.
- 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. 中国地质, 33(5): 1137~1143.
- 王文庆, 陈书平, 杨先范. 2012. 渤海海域侏罗—白垩纪沉积与构造演化. 地质科学, 47(2): 306~317.
- 王应斌, 黄雷. 2013. 渤海海域营潍断裂带展布特征及新生代控盆模式. 地质学报, 87(12): 1811~1818.
- 武振杰, 张传恒, 姚建新. 2009. 滇中中元古界大龙口组地震灾变事件及地质意义. 地球学报, 30(3): 375~386.
- 鄢继华, 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.
- 严兆彬, 郭福生, 彭花明, 杨志, 郭国林. 2005. 浙西寒武系大陈岭组地震事件沉积的初步研究. 地质学报, 79(6): 730~738.
- 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纪录及储集性能研究. 地质学报, 82(6): 805~813.
- 杨剑萍, 王海峰, 聂玲玲, 李亚, 张永, 李静. 2014. 冀中坳陷晋县凹陷古近系震积岩的发现及地质意义. 沉积学报, 32(4): 634~643.
- 杨文涛, 王敏. 2017. 河南南召盆地上三叠统太山庙组软沉积物变形构造及其古地理意义. 古地理学报, 19(1): 117~128.
- 叶涛, 韦阿娟, 祝春荣, 王粤川, 高坤顺, 曾金昌. 2016. 渤海海域基底"改造型火山机构"特征及油气成藏意义. 石油学报, 37(11): 1370~1380, 1434.
- 余一欣, 周心怀, 徐长贵, 魏刚, 吕丁友. 2017. 渤海海域郑庐断裂带差异构造变形与油气聚集. 地质论评, 63(supp.): 81~82.
- 袁静. 2005. 中国震积作用和震积岩研究进展. 石油大学学报(自然科学版), 29(1): 144~200.
- 张邦花, 田洪水, 张增奇, 杜圣贤. 2012. 地质名山馒头山及其附近早寒武世古地震沉积事件研究. 沉积学报, 30(6): 1021~1032.
- 张斌, 王萍, 王建存. 2011. 岷江上游堰塞湖沉积中软沉积物变形构造成因讨论. 地震研究, 34(1): 67~75.
- 张岳桥, 董树文. 2008. 郑庐断裂带中生代构造演化史: 进展与新认识. 地质通报, 27(9): 1371~1391.
- 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. 沉积学报, 30(6): 1032~1042.
- 周琦, 杜远生, 覃英. 2007. 贵州省松桃县大塘坡南华纪早期古天然气渗漏构造的发现及地质意义. 地球科学, 32(S1): 33~40.
- 朱萌, 李德威, 刘德民, 朱云海, 罗文行, 秦雅东. 2011. 柴达木盆地西南缘更新统震积岩特征及其意义. 古地理学报, 13(6): 1131~1137.
- Bao Jiafang, Zhao Yunjiang, Wang Chengpeng, Wang Wei, Yang Shipan, Zhang Kun and Ma Jinhua. 2002&. The discovery and significance on the seismites of Dashuitang Formation in the Upper Triassic series in Baoshan Jinji area of Western Yunnan. Acta Sedimentologica Sinica, 30(3): 490~500.
- Blatt H, Middleton G V, Millon R C. 1978. Penecontemporaneous deformation. In: Origin of Sedimentary Rocks. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 170~174.
- Chen Junfei, Zhang Changmin, Zhu Rui, Yang Bo, Yan Qi, Lu Xiaolin and Zhu Aiguo. 2017&. Physical simulation and mechanism analysis of soft-sediment slump deformation. Journal of Palaeogeography, 19(1): 139~146.
- Ding Guoyu. 1989&. Grouping and migration of faulting on quaternary faults. Quaternary Sciences, 1(1): 36~47.
- Du Yuansheng, Peng Bingxia, Han Xin. 2005&. Syn-depositional deformation structures by earthquake related to volcanic activity of the Late Pleistocene in Weizhou island, Beihai City, Guangxi. Sedimentologica Sinica, 23(2): 203~209.
- Du Yuansheng, Yu Wenchao. 2017&. Earthquake-caused and non-earthquake-caused soft-sediment deformations. Journal of Palaeogeography, 19(1): 65~73.
- Feng Xijie Dai Wangqiang. 2004&. Lateral migration of fault activity in Weihe basin. Acta Seismologica Sinica, 26(2): 174~182.
- Feng Zengzhao. 2017a&. A successful symposium of "Multi-origin of soft-sediment deformation structures and seismites". Journal of Palaeogeography, 19(1): 1~6.
- Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Zheng Xiujian and Wang Yuan. 2017b&. Researches of soft-sediment deformation structures and seismites in China; a brief review. Journal of Palaeogeography, 19(1): 7~12.
- Guo Shaoting, Tong Hengmao. 2015&. The fault response characteristics of stress field evolution in Qinhuangdao exploration area of Bohai Bay basin. Geological Review, 61(z1): 639~640.
- Huang Lei, Wang Yibing, Wu Qiang and Wang Qiang. 2012&. Cenozoic Tectonic evolution of the Laizhouwan Sag in Bohai Bay basin. Acta Geologica Sinica, 86(6): 867~876.
- Jewell H E, Etensohn F R. 2004. An ancient seismite response to Taconian far-field forces: The Cane Run Bed, Upper Ordovician (trenton) Lexington Limestone, central Kentucky. Journal of Geodynamics, 37: 487~511.
- Kyoungtae K, Kim S W, Li H J. 2017. Soft sediment deformation structures in a lacustrine sedimentary succession induced by volcano-tectonic activities: an example from the Cretaceous Beolgeumri Formation, Wido Volcanics, Korea. Sedimentary Geology, 358(1): 197~209.
- Li Yuanhao, Liu Chiyang, Wang Xiujian. 2008&. Discovery and significance of seismites in Late Tertiary Yanchang Formation of Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 26(5): 772~780.
- Liang Dingyi, Nie Zetong, Song Zhimin. 1994&. A re-study on seismite and seismo-unconformity: taking western Sichuan and western Yunnan as an example. Earth Science, 19(6): 845~850.
- Liu Lei, Chen Hongde, Xu Changgui, Zhong Yijiang and Wu Kui. 2015&. Study on seismite features and its time-space distribution law of Paleogene in Liaodong Bay depression. Acta Sedimentologica Sinica, 33(5): 919~922.
- Moretti M, Owen G, Tropeano M. 2011. Soft-sediment deformation induced by sinkhole activity in shallow marine environments: a fossil example in the Apulian Foreland (Southern Italy). Sedimentary Geology, 235(3~4): 331~342.
- Oksana V L, Andrey S G. 2016. Soft-sediment deformation structures induced by strong earthquakes in southern Siberia and their paleoseismic significance. Sedimentary Geology, 344: 5~19.
- Owen G, Moretti M. 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. Sedimentary Geology 235, 141 - 147.
- Qiao Xiufu, Li Haibing, Gao Linzhi. 1999&. Sinian—Early Paleozoic seismic rhythms on the north china platform. Earth Science Frontiers, 4(3): 155~160.
- Rodriguez M A, Calvo J P, Vicente G D, and Gomez G D. 2000. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine of the Prebrtic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitude during the Lats Miocene. Sedimentary Geology, 135: 117~135.
- Sebastien B, Francois C, Emmanuel C, Nathalie F and Marc D B. 2008. Reconstruction of the Holocene seismotectonic activity of the Southern Andes from seismites recorded in Lago Icalma, Chile, 39° S. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeogeology, 259: 301~322.
- Seilacher A. 1969. Fault-graded bed interpreted as seismites.

- Sedimentology, 13: 155~159.
- Shi Chenglong, Liu Dianbo, Cui Yilong, Zhang Chuanheng and Qiu Yuanzhe. 2016&. Soft-sediment structures developed in northern part of North China paleocontinent and their constraint on geodynamic environment of sedimentary basin. *Geological Review*, 62(1): 37~53.
- Song Tianrui. 1988&. A probable seismic-tsunami sequence in carbonate formation of Precambrian in Beijing Ming Dynasty Tombs. *China Science Bulletin*, 38(8): 609~611.
- Su Dechen, Sun Aiping, Zheng Guisen, Lv Jinbo and Guo Rongtao. 2013&. A preliminary research on the slump structures in Cambrian system in the Western Hills of Beijing. *Acta Geologica Sinica*, 87(8): 1067~1075.
- Tian Hongshui, Wan Zhongjie, Wang Hualin. 2003&. Discovery and preliminary study on seismites of the Cambrian Mantou Formation in the central Shandong area. *Geological Review*, 49(2): 121~132.
- Tian Hongshui, Zhang Zengqi, Zhang Banghua, Du Shengxian, Guo Guangjun and Lv Mingying. 2007&. Records of paleoseismic events in the red-silk stone bed in Linqu, Shandong. *Geology in China*, 33(5): 1137~1143.
- Wang Wenqing, Chen Shuping, Yang Xianfan. 2012&. Sedimentary and tectonic evolution during Jurassic and Cretaceous in the Bohai region. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*: 47(2): 306~317.
- Wang Yinbing, Huang Lei. 2013&. Distribution characteristic of the Ying-Wei fault zone offshore the Bohai sea and cenozoic Basin-controlling model. *Acta Geologica Sinica*, 87(12): 1811~1818.
- Wu Zhenjie, Zhang Chuanheng, Yao Jianxin. 2009 &. Neoproterozoic seismic catastrophic events in Dalongkou Formation of central Yunnan and their geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(3): 375~386.
- Yan Jihua, Cui YongBie, Chen Shiyue. 2009&. Identification of common facies indicators of seismites in simulated experiments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1131~1137.
- Yan Zhaobin, Guo Fusheng, Peng Huaming, Yang Zhi and Guo Guolin. 2005&. Pilot study on sedimentation of cambrian Dachenling Formation resulting from seismic events in the West of Zhejiang Province. *Acta Geologica Sinica*, 12(6): 730~735.
- Yang Jianping, Nie Lingling, Zhang Linpu, Yang Jun and Zhang Yue. 2008&. Reservoir characters and paleoseismic records in Neogene Wunan oilfield, southwestern margin of the Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 805~813.
- Yang Jianping, Wang Haifeng, Nie Lingling, Li Ya, Zhang Yong and Li Jing. 2014&. Discovery and geological significance of seismites of Paleogene in Jinxian Sag, Jizhong Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(4): 634~643.
- Yang Wentao, Wang Min. 2017&. Soft-sediment deformation structures from the Upper Triassic Taishanmiao Formation of the Nanzhao Basin in Henan Province and their palaeogeographic significances. *Journal of Palaeogeography*, 19(1): 117~128.
- Ye Tao, Wei Ajuan, Zhu Chunrong, Wang Yuechuan and Gao Kunshun. 2016&. Characteristic and petroleum exploration of Mesozoic basement "destructive volcanic edifices" in Bohai Bay area. *Acta Petroi Sinica*, 37(11): 1370~1380, 1434.
- Yu Yixin, Zhou Xinhuai, Xu Changgui, Wei Gang and Lv Dingyou. 2017&. Differential structural deformation of Tan-Lu fault zone and hydrocarbon accumulation in offshore Bohai Bay basin. *Geological Review*, 63(supp.): 81~82.
- Yuan Jing. 2005&. Research of seismic deposition and seismite of China. *Journal of the University of Petroleum*, 29(1): 144~200.
- Zeev L. 2010. Upper Campanian suspected silicified seismite related to the Syrian Arc tectonic system in the Middle East. *Journal of Africa Earth Science*, 57, 297~305.
- Zhang Banghua, Tian Hongshui, Zhang Zengqi and Du Shengxian. 2012&. Paleoseismic depositional events of the famous geological mountain—Mantoushan and its vicinity in the early Cambrian. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(6): 1021~1032.
- Zhang Bing, Wang Ping, Wang Jianchun. 2011&. Discussion of the origin of the soft-sediment deformation structures in paleo-dammed lake sediments in the upper reaches of the Minjiang river. *Journal of Seismological Research*, 34(1): 67~75.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen. 2008&. Mesozoic tectonic evolution history of the Tan-Lu fault zone, China: advances and new understanding. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1371~1391.
- Zhao Can, Li Xubing, Li Zhihong, Yu Yushuai, Zhang Hua and Liu An. 2012&. Characteristics and geological significance of seismites of the Doushantuo Formation in Xikou, Hunan Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(6): 1032~1042.
- Zhou Qi, Du Yuansheng, and Qin Ying 2007&. Discovery of Nanhuan ancient. *Earth Science*, 32(6): 845~853.
- Zhu Meng, Li Dewei, Liu Demin, Zhu Yunhai, Luo Wenxing and Qin Yadong. 2011&. Characteristics and significance of seismites in the Pleistocene in southwestern margin of Qaidam Basin. *Journal of Palaeogeography*, 13(6): 1131~1137.

The Characteristics of Soft-sediment Deformation Structures within the Lower Palaeozoic of Southwest Bohai Sea and Its Geological Implications

YE Tao, WEI Ajuan, GAO Kunshun, SUN Zhe, GUO Ying, LI Fei

Tianjin branch of China National Offshore Oil Company Ltd., Tianjin, 300452

Objectives: Soft-sediment deformation structures have been identified in Gushan Group of Cambrian of lower Palaeozoic in Bohai Sea area for the first time.

Methods: Based on the detailed observation and description of drilling cores, typical sedimentary structures including liquefied diapir structure, liquefied carbonate volcano, liquefied micrite-vein, liquefied breccias and step micro-faults have been observed.

Results: There are liquefied diapir structure—liquefied micrite-vein belt, liquefied breccias zone and step micro-faults belt from bottom to top in vertical profile of the both stages according to the brittle and plastic deformation characteristics. Email: tao_y2012@163.com

Conclusions: The seismites of this formation may be account for the activities of ancient Tanlu fault zone in Cambrian, and is also the response of the splitting of the Sino-Korean plate which cracked into North China plate and Jiaoliao plate.

Keywords: Bohai Sea area; Lower Palaeozoic; Gushan Group; soft-sediment deformation structures; Palaeo Tanlu fault zone

Acknowledgments: This study was supported by the Major National Oil and Gas Projects (No. 2016ZX05024-003)

First author: YE Tao, male, exploration geo-engineer, mainly working on exploration of oil and gas, Email: Tao_y2012@163.com

Manuscript received on: 2017-10-11; Accepted on: 2018-09-11; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.016

(上接第 1446 页)

新喀里多尼亚蛇绿岩主要呈两个巨大的推覆体产出: (1) Poya terrane, 主要由辉绿岩和枕状玄武岩组成, 并被晚白垩世硅质页岩覆盖; (2) New Caledonia Peridotite Nappe (新喀里多尼亚橄榄岩推覆体), 主要出露于该岛的南部地区。野外考察期间, 对该蛇绿岩以及相关的玻安岩、铬铁矿、枕状玄武岩及辉长岩等进行了详细的野外观察。本次野外考察的组织为国内外同行提供了学习和认识全球典型蛇绿岩带的难得机遇, 深受与会者好评。

国际地学计划 IGCP-649 项目“金刚石与地幔再循环”是由联合国教科文组织 (UNESCO) 和国际地质科学联合会 (IUGS) 共同发起资助的国际地质科学计划 (2015 ~ 2020 年)。该项目主要研究全球范围内不同造山带中蛇绿岩地幔

橄榄岩和铬铁矿及其伴生矿物的成因研究, 探讨大洋岩石圈地幔的形成和演化过程以及壳幔物质深部再循环的地球前沿热点问题, 自 2015 年起, IGCP-649 项目组已分别于中国青海、塞浦路斯、古巴和新喀里多尼亚组织了 4 次全球范围内蛇绿岩的大型野外考察及学术研讨会, 探讨全球地幔组成及其动力学相关的重要科学问题, 为多个国家不同年龄段的地质学者建立了合作研究的平台。

NIU Xiaolu, FENG Guangying: The 4th International Symposium on Ophiolite of IGCP-649 Project Held in the University of Queensland, Australia

(牛晓露, 冯光英 供稿 章雨旭 编辑)



新喀里多尼亚野外考察