

文章编号: 0253-2697(2014)03-439-11 DOI:10.7623/syxb201403004

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

邵珠福¹ 钟建华^{1,2} 范莉红¹ 李 勇¹ 刘 宝³ 李竹强⁴ 罗 可¹ 王韶洁¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院 山东青岛 266580;

2. 中国科学院广州地球化学研究所 广东广州 510640; 3. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院盆地研究所 辽宁盘锦 124000;

4. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司西部新区研究中心 山东东营 257061)

摘要:以区域构造背景为基础,通过对 28 口井近 1000 m 岩心的详细观察,在辽河西部凹陷南段古近系沙河街组三段中识别出典型的震积岩。其代表性沉积构造有:微断层和地裂缝、液化砂(砾)岩脉、震动液化卷曲变形、环状层理、负载构造、震积角砾岩和震油积岩等,其中液化砂岩脉和震积角砾岩是主要类型;震积岩垂向序列划分为阶梯状断层段、液化砂岩脉层段、液化卷曲变形层段、震裂岩和自碎角砾岩层段、震塌岩和内碎屑副角砾岩层段、震油积岩层段 6 个部分。震积岩研究有助于恢复古构造演化史和寻找岩性油气藏及构造-岩性油气藏;微断层、地裂缝和液化砂岩脉有利于改善储层条件,地震流体可促进烃源岩演化和成岩作用,同时震积角砾岩本身也是良好的储层。

关键词:震积岩;西部凹陷;沙河街组三段;软沉积变形;石油地质

中图分类号:TE122.14

文献标识码:A

Characteristics and petroleum geologic significance of seismites in the Member 3 of Shahejie Formation in south section of western sag, Liaohe depression

Shao Zhufu¹ Zhong Jianhua^{1,2} Fan Lihong¹ Li Yong¹ Liu Bao³ Li Zhuqiang⁴ Luo Ke¹ Wang Shaojie¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Section of Basin Research, Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin 124000, China; 4. Western New Prospect Research Center, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257061, China)

Abstract:Based on the analysis of regional tectonic setting, this study identifies typical seismites of the Palaeogene Member 3 of Shahejie Formation in the south section of western sag, Liaohe depression through detailed observation of cores approximately at a depth of from 28 drillholes. In the study area, representative sedimentary structures include micro-faults, ground fissure, liquefied sandstone (conglomerate) dykes, liquefied crinkled deformation caused by vibration, annular bedding, load structure, seismo-breccias, and seismo-turbidites. Of these, liquefied sandstone dykes and seismo-breccias are the major types. The vertical sequence of seismites is classified into six intervals, i. e., step fault interval, liquefied sandstone dyke interval, liquefied crinkled deformation interval, interval of shattered rock and autoclastic breccia, interval of seismic-induced collapsed rock and intraclastic parabreccia, and seismo-turbidite interval. Research of seismites helps the reconstruction of paleostructural evolution and the discovery of lithologic and structure-lithologic hydrocarbon reservoirs. The presence of micro-faults, ground fissure, and liquefied sandstone dykes is conducive to the improvement of reservoir conditions. Seismic fluid facilitates the diagenesis and evolution of hydrocarbon source rocks, while shattered breccia itself provides a good reservoir rock for hydrocarbon accumulation.

Key words: seimite; western sag; Member 3 of Shahejie Formation; soft sedimentary deformation; petroleum geology

地震是指由断裂活动、火山作用、地层错动变形和崩塌陷落等因素诱发而产生的地壳快速剧烈颤动,是地壳运动的一个特殊而直观的表现形式^[1,2],其主要集中于地壳活动带上。地震对于沉积作用的影响一是直接作用于沉积物形成典型的震积记录,二是作为触发机制诱发山体滑坡、海啸、滑塌搬运和重力流^[3]。震积作用

就是在不同构造背景下受地震作用力(地震振动力、剪切力、挤压力和拉张力等)改造形成的原地、准原地或异地沉积作用。震积岩原意指某构造活动区域未固结的水下沉积物受到地震活动改造再沉积形成的沉积层,最早由 Seilacher 于 1969 年提出^[4],其本质是指具有震积构造和震积序列的、有一定成因联系的一组岩石组

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41172093)资助。

第一作者及通信作者:邵珠福,男,1984 年 9 月生,2007 年获中国石油大学(华东)学士学位,现为中国石油大学(华东)地质学专业博士研究生,主要从事重力流沉积及非常规油气地质研究。Email: kangzhu09@yeah.net

合^[2],包括原地震积岩、海啸岩和震浊积岩。早在20世纪50年代,地质学家 Heezen 就对加拿大格兰德班克地震形成的浊积岩进行过研究^[5],随后不同学者针对不同地区、不同时代和不同岩性的震积岩开展过研究^[6-13]。

中国震积岩研究最早始于1988年宋天锐对北京十三陵地区中元古界雾迷山组碳酸盐岩的研究^[14],其后20余年乔秀夫^[15-23]、杜远生^[1,24-27]和其他学者^[28-31]对海相地层中的震积特征和地震序列做过详细的研究,成果丰硕。中国陆相湖盆震积岩研究始于吴贤涛等^[32],近年来,不少学者在松辽盆地中生界^[33,34]、柴达木盆地新近系^[35-38]、渤海湾盆地古近系^[39-45]、鄂尔多斯盆地上三叠统^[46,47]和其他含油气盆地中^[48]陆续发现了震积岩,并对其成因机制和影响因素等进行了探讨^[49-51]。陈杰等于2007年首次在辽河拗陷东部凹陷沙河街组发现震积岩^[52],同属相同构造背景的辽河西部凹陷古近系至今无震积岩的相关报导。笔者通过岩心观察在辽河西部凹陷南段沙河街组三段(简称沙三段)地层中发现震积岩的存在,对其典型识别标志进行了叙述,并对其地质意义进行初步探讨。

1 区域地质概况

辽河拗陷地处渤海湾盆地东北角,西部凹陷位于辽河拗陷西部,为中生代—新生代裂谷型断陷湖盆,北邻大民屯凹陷,西接西部凸起,东靠中央凸起,向南延伸至辽东湾。整体地质地形特征为东陡西缓,北高南低,北窄南宽,东断西超,为一呈SE向倾斜的狭长箕状凹陷,面积为2560 km²。凹陷自西向东依次分布有西部斜坡带、坡洼过渡带、中央隆起带、洼陷带和东部陡坡带(图1)^[53-55]。

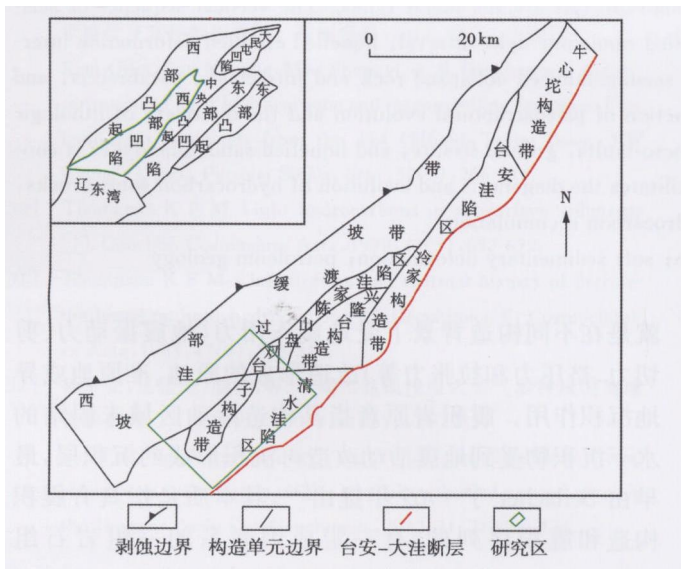


图1 辽河西部凹陷南段位置^[55]

Fig. 1 Location of the south section of western sag in Liaohe depression

古近纪盆地演化经历了初始裂陷、强烈断陷、拗陷过程,沉积地层表现出多旋回性。古近纪沙河街组三段沉积期为渤海湾盆地强烈断陷期,济阳拗陷和临清拗陷等均发育大量的震积岩^[39-45],西部凹陷南部台安一大洼断层和斜坡带一系列NE向和EW向同沉积断层活跃,坡度陡、水体深、物源丰富,沉积坡折带前方及扇三角洲前缘斜坡广泛发育砂质碎屑流和浊流沉积,湖底扇体面积大、砂层厚、埋深大,主要为大套厚层砂砾岩、砂岩和暗色泥岩互层。

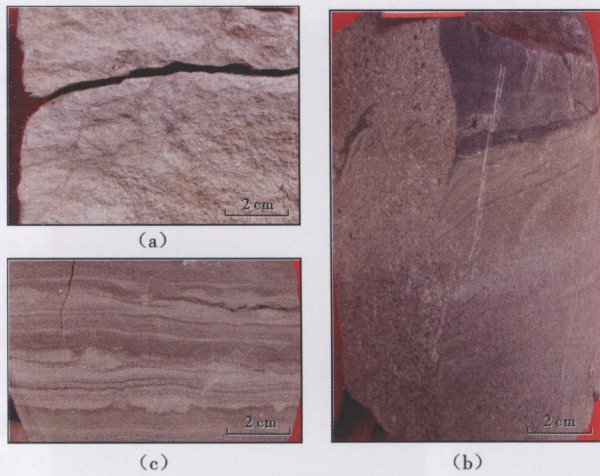
2 震积岩特征

震积岩的特征主要表现在其软沉积变形特征、岩石和序列组合特征。软沉积变形特征是指地震导致未固结沉积物的液化、变形等特征;岩石和序列组合指地震引起沉积物的滑塌、褶皱、破碎、滚动等及其沉积单元组合特征。不少学者曾通过实验方法研究震积岩^[56-58],按照不同的分类标准,震积构造可以分为若干类型^[59]。笔者综合考虑震积岩成因机制、位置、形成时间和沉积物性质,重点研究震积岩的典型识别标志。

2.1 微断层和地裂缝

微断层又称微同沉积断裂、阶梯状断层等,是原地沉积物受到地震波震动后在层内形成的、规模相对较小、一系列相互平行的阶梯状断层,也可以单独发育或者是交织的网状系统。研究区目的层中微断层较常见,发育在薄层砂岩或者砂岩和泥岩薄互层中,一般为张性断层,断面较陡,呈不规则状或上陡下缓的犁形,断层延伸较短,多在0.5~5.0 cm后自行消失,断距0.1~1.0 cm,相互平行断层间距0.5~3.0 cm,仅限于层内发育[图2(a)],有时微断层呈现地堑、地垒等形状。微断层一般是在地震液化作用停止后,沉积物体积缩小、重新压实,由于拉张力导致差异性沉降形成^[37],有时充填砂质或泥质,常和地裂缝、微型褶皱等伴生。除微型阶梯状断层以外,小型正断层也是地震作用的典型构造[图2(b)],地震拉张导致的差异压实作用形成高角度正断层,断面不稳定,倾角80°~90°,断距大于10 cm,断面左侧为含砾粗砂岩,右侧上部为暗黑色块状页岩,下部为略显正粒序的粗砂岩—细砂岩—粉砂岩组合,砂岩—泥岩接触面处具有明显的断层活动的牵引变形构造,反应了液化后含砾砂岩沿断面快速下滑过程。

地裂缝也是地震过程中形成、以张性断裂为主,裂缝上宽下窄,向下尖灭呈“V”字形,规模较小,如图2(c)右下角地裂缝宽约0.5 cm,高约0.5 cm,充填泥质,地裂缝不穿层,是地震时沉积层震动和液化的共同结果^[41]。



(a)微断层,断距 0.5 cm,断面倾角 60° 至 70° ,延伸 5~7 cm,齐 72 井 2 841 m; (b)小型高角度正断层,双 225 井 4 119.6 m; (c)地裂缝,齐 123 井 3 192.95 m。

图 2 震积岩中微断层和地裂缝特征

Fig. 2 Micro-fracture and ground fissure features of seismites

2.2 液化砂(砾)岩脉、泄水构造

液化构造和泄水构造是震积岩最典型的标志,也是研究区段最常见的震积构造之一,液化和泄水构造代表着地震作用的高潮期。饱含水、分选好的弱固结粉细砂岩层最容易受到地震作用而发生变形。地震前,饱含水的砂层所承受的外力由骨架承受。地震作用时,受 P 波、S 波和面波影响,松散的颗粒受到剪切力作用而重新排列,使得孔隙减小、流体排出从而导致流体压力增大。随着此过程的加剧,异常高流体压力承载了一部分骨架有效压力,从而导致超孔隙压力^[22],流体流动形成的拖拽力大于颗粒的有效压力时液化便产生了,流体携带颗粒“上蹿下跳”而形成各种砂(砾)岩脉、泄水构造和伴生构造。液化层作为变形构造的主动方,而周围的相对稳定层则成为变形被动方。

震级大小、液化层厚度及颗粒大小和密度、黏度、上下围岩“堵截”能力和固结程度等是影响液化的主要因素,有的脉体是砂(砾)岩及泥岩沿地震断裂面顺层挤入形成。杨剑萍等根据形态将液化岩脉分为喉道状、脉络状、飘带状、尖突状和“V”字状 5 种类型^[36,43]。通过岩心观察,笔者在研究区识别典型的液化岩脉及其伴生构造。

2.2.1 液化砂岩脉

作为常见的软变形构造,液化砂岩脉形态多样,研究区常见的液化砂岩脉有飘带状、肠状、蘑菇状、滴漏状、团块状和不规则状等形态,垂直向上或者向下、倾斜或者水平方向延伸[图 3(a)—图 3(d)]。从岩心顶面观察,岩脉截切面呈现蠕虫状、半环形、三角形、多边形和无规则形,长 0.1~3.0 cm,代表岩脉或者岩墙的

宽度[图 3(e)—图 3(f)]。

(1) 飘带状岩脉。当下部细粒砂岩层较薄而上覆泥岩较厚时,受地震波影响饱含水的薄层砂岩因液化向上运移挤入上覆厚层泥岩并终止于其中而呈现飘带状。如图 3(a)所示,双深 3 井 2 861.1 m 处细长的飘带状砂岩脉近水平—倾斜展布,厚 0.3~0.8 cm,延伸 5~7 cm,偶有错断。

(2) 肠状砂岩脉。当上、下泥岩层都较厚,而中间砂岩层较薄且地震导致液化程度较高时,形成近于水平方向侵入的肠状液化砂岩脉,如图 3(b)双 52 井 3 019.07 m 处肠状液化砂岩脉,从液化根部到端部厚度变薄,厚 3~11 cm,延伸长度 5~9 cm。此处顺层岩脉因显肠状而易被识别,有些顺层岩脉容易被错认为薄层砂岩。顺层液化岩脉特点是:①顺层岩脉界面岩性突变,参差不齐;②围岩在界面上有撕裂现象,而沉积界面无足够能量形成撕裂屑;③岩脉中夹有围岩碎片,形态复杂;④砂脉的厚度不均,变化大且容易分叉或尖灭中止。

(3) 蘑菇状砂岩脉。如图 3(c)下部似蘑菇状液化砂岩脉,脉体上宽下窄、参差不齐,宽 0.5~2.0 cm,是下部厚层砂岩在高孔隙压力推动下,沿阻力较小方向流动斜向上挤入,并切穿上覆薄层岩层后突然中止形成。而图 3(c)中右上方液化砂岩脉是液化程度更强的砂岩切断下伏薄层泥岩形成,加之重力作用,而呈现不规则形状,粗细不等,偶有中断。

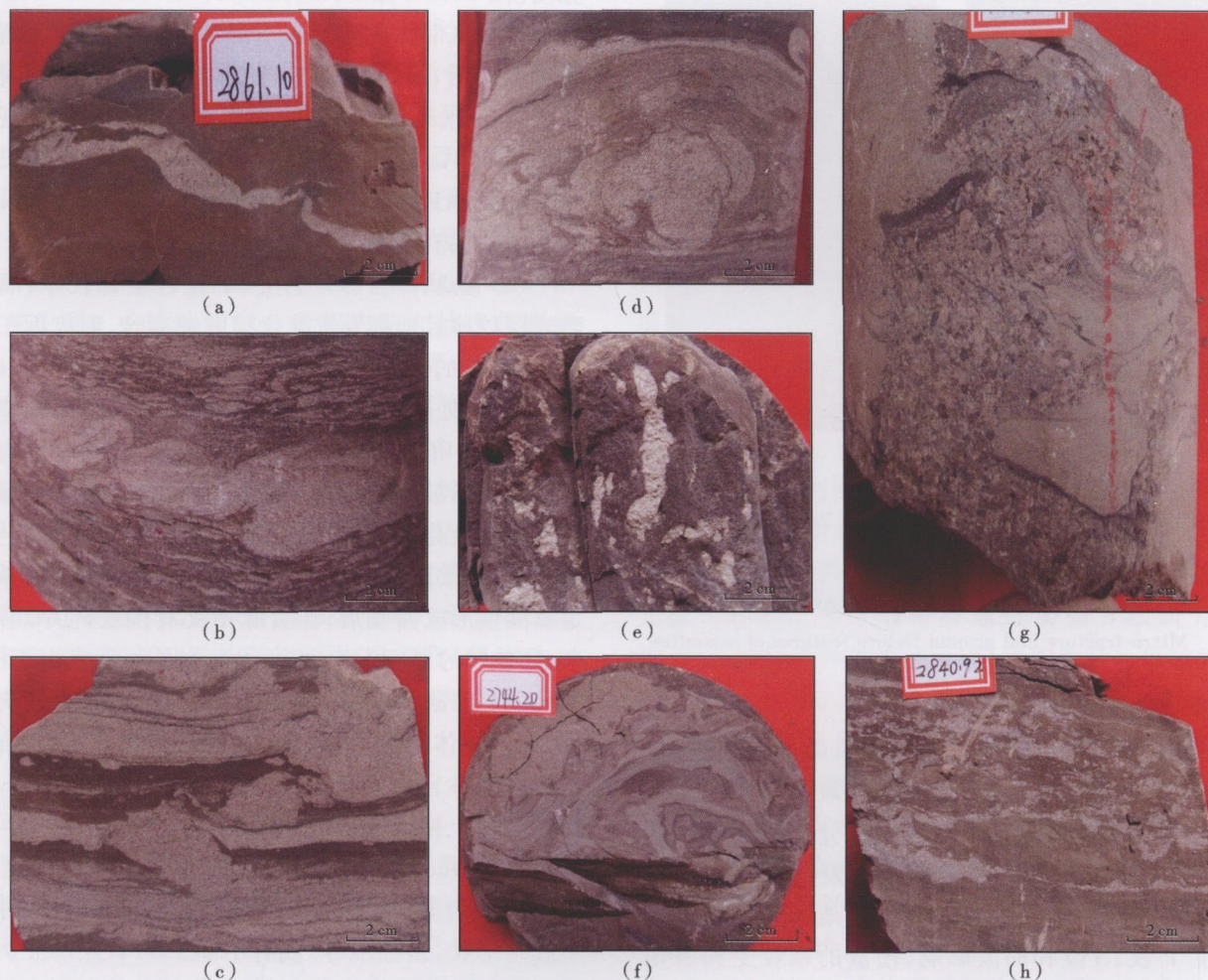
(4) 不规则状岩脉。因液化强度不同,砂岩脉会随机向各个方向“窜动”而呈现出不规则状的液化砂岩脉复合体,一般出现在厚度较大的液化砂岩层中,如图 3(d)中复杂的液化综合体中岩脉岩呈现“云团”状、圆形、肾形等。

2.2.2 液化砾岩脉

不少学者认为液化脉体只能发育于砂岩中,尤其是颗粒较细、分选较好的砂岩^[22,60]。实际上液化同样可以产生在砂砾岩中,前提是地震能量足够强大(7 级以上)。如图 3(g)所示,饱含水的砂砾岩在强烈地震作用下向上窜动,冲断上覆分选较好的细砂岩,由于能量较强,一方面在运动过程中撕卷了一些未固结的塑性泥岩混搅其中,另一方面在液化流动过程中将固结程度相对较好的细砂岩冲断使其破碎形成液化角砾。

2.2.3 液化网状脉体

网状脉体是一种复杂的液化粉砂体,外形极不规则、层薄,呈错综交织的网状,又像是砾岩的基质和胶结物,是粉砂颗粒在液化后挤入和撕裂半固结的泥,并经过一定距离的搬运或者滑塌作用而充分变形形成的。砂岩和泥岩混合物均具有塑性变形的特点,与液化砂岩脉相伴生,并非风暴搅动或水下塌密度流的产物[图 3(h)]。



(a) 飘带状液化砂岩脉, 双深3井 2861.1 m; (b) 肠状液化砂岩脉, 上、下围岩液化破碎, 双52井 3019.07 m; (c) 蘑菇状不规则砂岩脉, 齐123井 3192.8 m; (d) 复杂的液化砂岩脉, 云团状、圆形、肾形, 双52井 2933.5 m; (e) 液化砂岩脉岩心顶面构造, 蠕虫状、多边形、三角形、无规则状, 0.1~3.0 cm, 齐123井 3193.05 m; (f) 液化砂岩脉顶岩心顶面构造, 半环形, 欢640井 2744.2 m; (g) 液化砂砾岩脉体, 双225井 4119.8 m; (h) 液化网状脉体, 齐72井 2840.92 m。

图3 液化岩脉特征

Fig. 3 Liquefied dyke features

2.2.4 泄水构造

地震引起的强烈剪切力引起超孔隙水压力, 从而诱发液化, 松散的沉积颗粒随孔隙水的泄出形成泄水脉或者碟状构造^[19]。如图4(a)所示, 泄水砂体向上运移刺入上覆砂体中, 砂体高度约2 cm, 向上逐渐尖灭, 形态酷似火焰构造, 称之为砂火山, 与之不同的是砂火山为砂岩泄水变形构造, 而火焰构造是与负载构造相伴生、未固结泥岩的塑性变形^[35]。此处变形砂岩与上覆砂岩岩性基本相同, 可能是剪切力导致的液化程度不同而形成了此泄水构造。

2.2.5 鳌状构造

鳌状构造是震积岩中几何形态酷似螃蟹鳌的泥岩碎片, 是一种特殊形式的地震液化构造, 由于含水砂岩孔隙大而易于变形, 泥岩含水少且固结程度好, 地震液

化后, 砂岩流动把泥岩胀裂形成鳌状构造。如图4(b)所示, 鳌状构造由泥岩构成, 前端分叉张开, “叉”长1.5~3.0 cm, “臂”长约2 cm, 鳌状构造常与液化砂岩脉和液化卷曲变形构造等伴生。

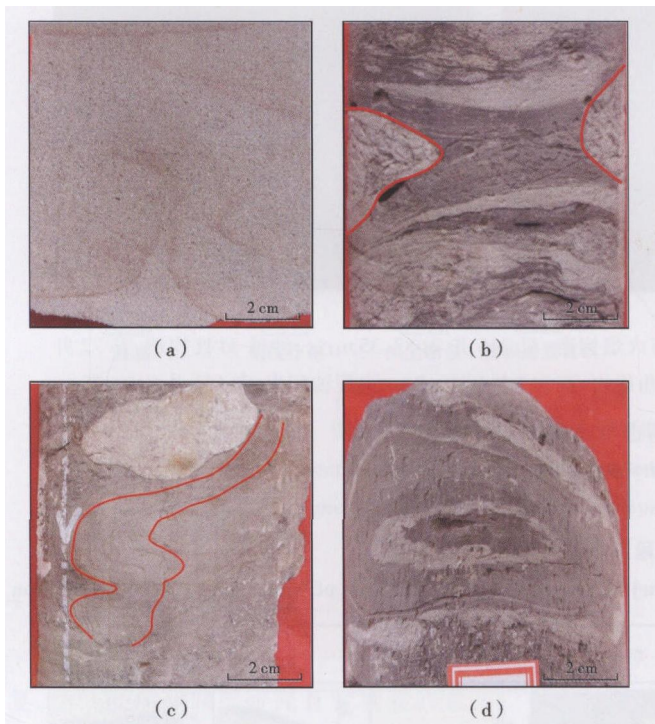
2.3 振动液化卷曲变形构造

液化卷曲变形构造也称同沉积褶皱变形、含水塑性变形、微型褶皱、震褶岩等^[15,48]。液化卷曲变形构造是可塑性的细砂质或泥质沉积物在地震剪切力作用下发生卷曲形成一系列形态各异的小型斜歪或平卧揉皱^[52], 其特点是: ①层内发育, 上下纹理不发生变形; ②小型揉皱或褶皱构造连续而无错断, 但形态各异, 轴面无规律可循且规模较小, 变形多在厘米级; ③垂向剪切运动而横向或斜向褶曲变形, 与液化和阶梯状断层伴生。如图4(c)中液化卷曲变形构造, 变形细砂岩厚

1~3 cm,呈近似平卧小型褶皱,下部伴有液化砾岩脉体,上部为灰白色假结核砾石。

2.4 环状层理

环状层理也是震积岩中常见的构造,是薄层状未固结的软沉积物受到较弱地震(小于5级)剪切作用伸展变形的产物^[47,61],一般发生在完全液化之前。袁静等在研究济阳拗陷古近纪软沉积物变形时将环状层理划分为6种类型,并认为震动塌落、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主要成因类型^[42]。如图4(d)中薄层砂岩和泥岩在地震作用下形成的闭合同心状环形层理,砂层厚度0.5~1.0 cm,泥岩厚度1~2 cm,环形层长轴平行于层面,短轴垂直于层面,其是碎屑流沿软底剪切移动形成的^[48]。



(a)泄水构造,齐123井3193.4 m; (b)鳌状构造,齐133井3182 m; (c)液化卷曲变形构造,齐233井2566.95 m; (d)环状层理,双216井2761 m。

图4 液化砂变形特征

Fig. 4 Liquefied sandy deformation features

2.5 负载构造

负载构造主要包括重荷模、火焰构造、砂球-砂枕构造和枕状层。这些构造是由于上、下相邻沉积层之间存在较大的密度差异,当地震液化作用结束后,沉积物体积收缩,在振动和重力的作用下,上覆细砂、粉砂层发生断裂、解体,形成规模不等的块状砂岩向塑性泥质沉积物中沉陷而成的,多是垂向上的运动。重荷模上窄下宽,底部也不平,厚度在侧面有变化,内部的层

理通常轻微变形并且和火焰构造伴生,与Alfaro的“drop structures”相似^[62][图5(a)、图5(b)],重荷模0.5~1.5 cm,火焰构造高1~3 cm。当砂层呈枕状或球状脱落并坠入下伏泥质沉积物中,伴随着塑性变形和脱水作用呈不规则碎块状、球状、枕状等形状,则形成枕状构造或球状构造,如图5(c)所示,坠落砂岩块的大小从几毫米到几厘米不等,形态也多变。随着液化变形和下沉作用的持续增强,下伏泥岩中砂团在振动变形过程中密集排列构成枕状层[图5(d)]。

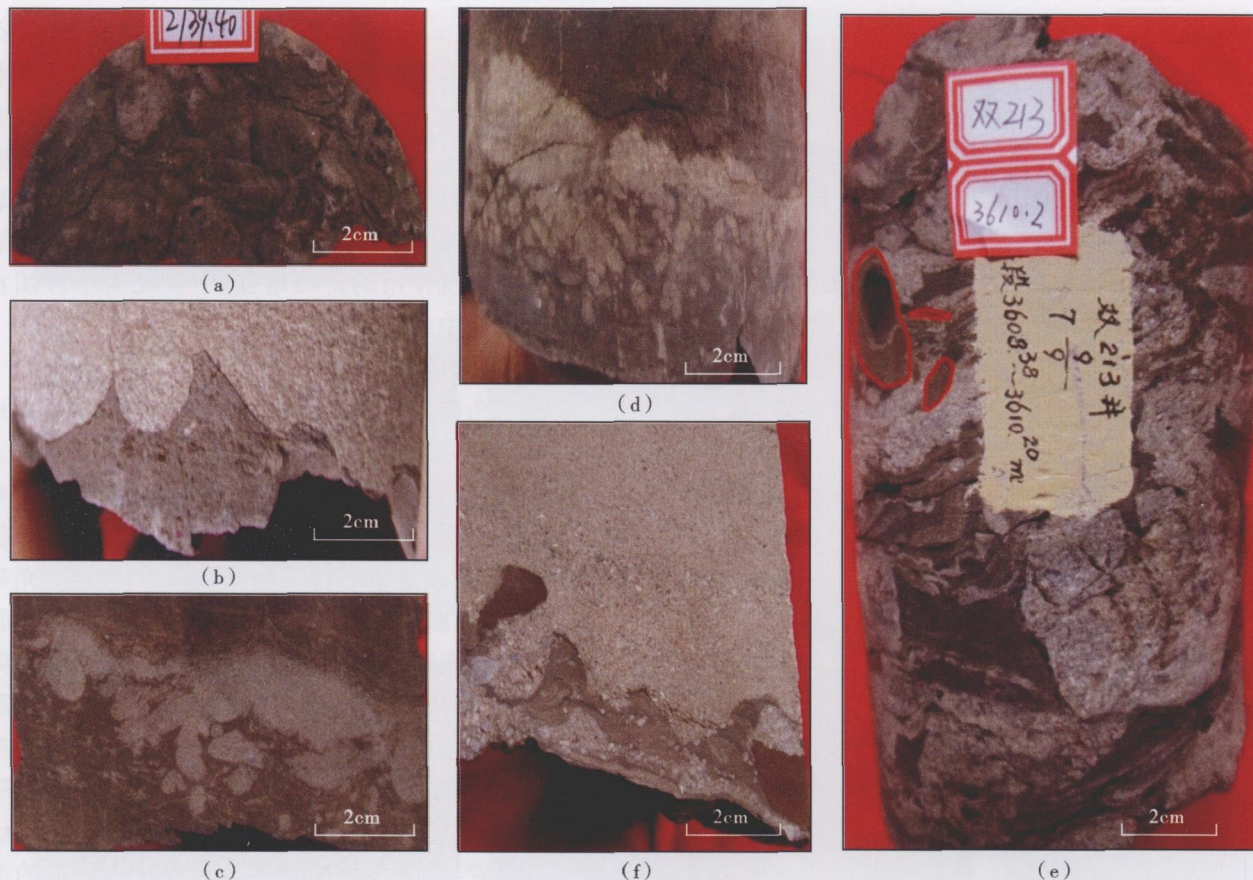
2.6 震积角砾岩

震积角砾岩又称震碎角砾岩或震塌岩,是指地震波动破坏原始沉积层而形成的、角砾状的破碎岩。震碎角砾岩包括自碎屑角砾岩和内碎屑副角砾岩2种类型^[63]。自碎屑角砾岩指原地沉积泥岩被震碎,砾石保持原位,呈长条状近似平行于层面方向;内碎屑副角砾岩为被撕裂、截断和震松的泥岩碎块就近搬运堆积而成。泥砾纹层方向明显斜交于岩石层面,并沿纹层方向被撕裂,为自碎屑进一步搬运异位沉积角砾岩^[1]。震碎角砾岩分选和磨圆较差,有的泥岩碎屑具有可拼接性[图5(e)]。震碎角砾泥岩呈撕裂状混杂于液化砂岩之间,角砾大小为0.2~3.0 cm,泥砾基本为黑色,为自碎屑角砾岩,局部具可拼接性。注意红线圈定的泥砾为棕褐色且具有一定磨圆、固结程度相对较好,为重力流搬运的近岸泥砾在此沉积并受地震作用破碎,当属内碎屑副角砾岩。

2.7 震浊积岩

震浊积岩是指由地震作用引发的重力流搬运和异地沉积形成的岩石^[1],这里的重力流包括了碎屑流和浊流的概念。地震结束后引起沉积物的垮塌和重力搬运,震浊积岩一般与震积岩共生,位于震积岩上方。研究区辽河西部凹陷南段古近纪时期同沉积断层活跃、气候湿润、西部物源供给充分,大量的砂砾岩体堆积在扇三角洲前缘及破折带附近,在地震触发下极易发生沉积物垮塌和碎屑流-浊流沉积从而形成震浊积岩,一般发育明显的震积岩和浊积岩特征。如图5(f)中震浊积岩底部具有明显的冲刷面和卷起的塑性泥屑、整块岩石具有正粒序性,为鲍马序列AB段沉积,中间夹杂有薄层液化砾岩脉。

从研究区典型的实例出发,结合前人研究成果得知,地震作用的准同生期、同生期和后期均受到伸展、挤压和剪切变形,液化作用主要发生在软沉积物同生期,剪切作用导致同沉积断裂、揉皱变形及重力滑塌作用,弱固结或脆性岩层受地震作用产生震裂岩、震碎角砾岩等,地震导致的震浊积岩和海啸岩典型的标志是鲍马序列和津浪丘状层理(表1)。



(a)底模构造,齐 231 井 2739.4 m,岩心底面照片;(b)负载构造与火焰构造,双 216 井 2687.35 m;(c)砂球-砂枕构造,齐 72 井 2840 m;(d)砂球-砂枕构造、枕状层,双 202 井 4173.4 m;(e)震碎角砾岩,双 213 井 3610.2 m;(f)震浊积岩,齐 123 井 3194.75 m。

图 5 震积构造特征

Fig. 5 Seismo-sedimentary structure features

表 1 辽河西部凹陷南段沙三段震积岩种类和典型特征

Table 1 Types and typical features of seismites in Member 3 of Shahejie Formation in south section of western sag, Liaohe depression

位置	成因	标志	形成时间	沉积物性质	研究区典型现象
	液化	液化砂岩脉、液化卷曲变形、泄水构造、鳌状构造、液化角砾岩	准同生期	软沉积物	
原地	挤压 拉伸 剪切	地裂缝、同沉积断裂、震碎角砾岩、板刺构造、丘-槽构造、环状层理	同生期 后生期	弱固结脆性层	
	重力 震动	底模构造、火焰构造、砂球-砂枕构造、枕状层	准同生期	软沉积物	
准原地	挤压 拉伸 剪切	地震断裂、震裂角砾岩、揉皱构造	准同生期 同生期 后生期	弱固结脆性层	
异地	重力 挤压 拉伸 剪切	滑动、滑塌、砂质碎屑流、震浊积岩、津浪丘状层	后生期	软沉积物 弱固结脆性层	

3 震积岩垂向序列

沉积序列是沉积单元的规律组合,反映沉积环境的规律变化或沉积作用过程^[1]。中国自从第一个地震-海啸序列建立以后^[14],很多学者都建立了海相地层中碳酸盐岩震动液化序列、震积岩与震积不整合序列、萨布哈震积序列^[15,19,24,28]和陆相碎屑岩震积垂向序列^[32,35,48],但由于观测手段的局限性和不同学者认识的差异性,不同学者提出的垂向序列有较大区别,如仅济阳拗陷古近系的地震序列就有至少 6 个版

本^[39-41],这也可能是地震作用的复杂性导致各种序列存在的缘故。地震发生时,首先对先存沉积物进行改造形成原地震积岩,继而触发海(湖)啸形成海(湖)啸岩,最终引发重力流形成震浊积岩;当地震过后,地壳恢复平静接受正常沉积。根据研究区岩心观察结果,笔者充分考虑到地震作用时期和原地、准原地和异地震积岩特征,将辽河西部凹陷南段沙河街组三段震积岩垂向序列划分为 6 个单元,分别是阶梯状断层段、液化砂岩脉层段、液化卷曲变形层段、震裂岩和自碎角砾岩层段、震塌岩和内碎屑副角砾岩层段和震浊积岩层段(图 6)。

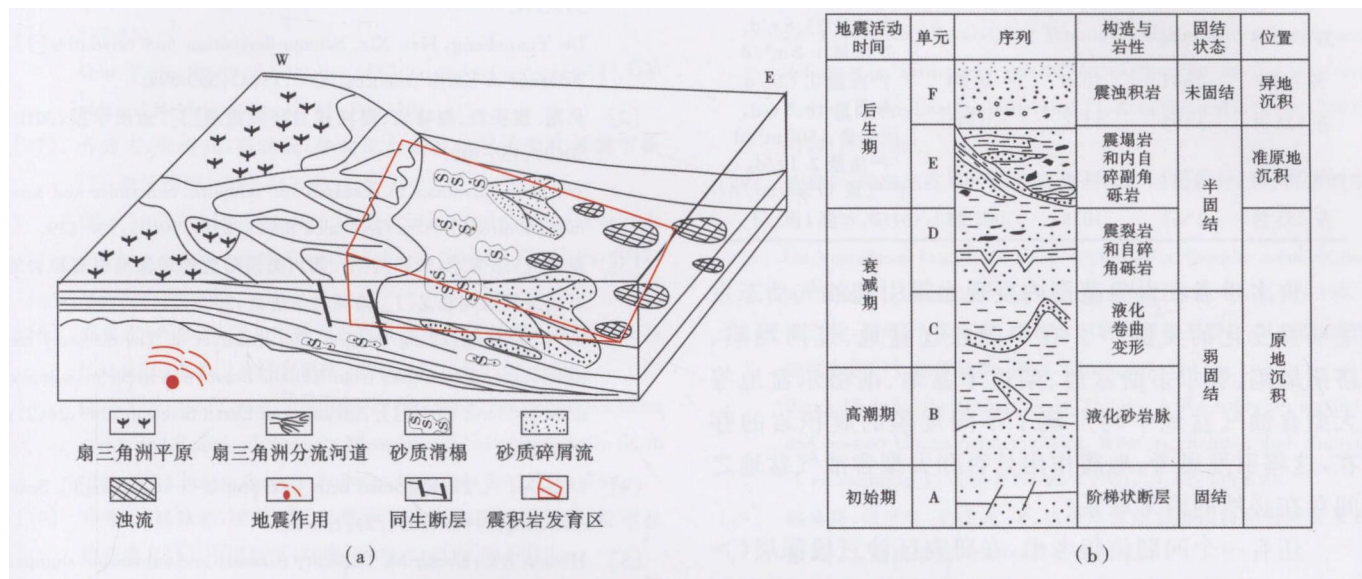


图 6 辽河西部凹陷南段沙河街组三段沉积模式和震积岩垂向序列

Fig. 6 Sedimentation model and vertical sequence of seismites in Member 3 of Shahejie Formation in south section of western sag, Liaohe depression

4 震积岩石油地质意义

作为古地震的标志性产物,震积岩对于古构造恢复、油气勘探和储层研究有着重要的意义。

(1) 震积岩作为地震相的岩石学标志,可以揭示古地震的存在。地震作用主要发育于裂谷盆地、活动大陆边缘盆地、走滑盆地、拉分盆地、缝合线盆地、前陆盆地以及上述盆地动力学相关的毗邻地区^[27]。辽河西部凹陷所属的渤海湾盆地在古近纪属于典型的裂谷盆地,沙三段沉积期为强烈的裂陷期,因此构造运动活跃,极易发生地震,尤其是控盆边界断层和同沉积断层附近,本研究区双 216 井、双 52 井和齐 72 井处于盆地内部同沉积断裂附近,震积岩较发育。因此震积岩对于恢复古构造背景及活动性、解决盆地的构造演化及古地震活跃期等有着重要的指示意义。

(2) 地震作用诱发三角洲前缘或坡折带下降盘沉积物滑塌形成重力流沉积,为隐蔽油气藏的形成奠定了物质基础。辽河西部凹陷南段沙三段沉积期气候温

暖湿润、构造活跃、物源充足,大量砂砾岩体堆积在西部斜坡带扇三角洲前缘和一系列 NE 向展布的同沉积断层边缘,受地震触发垮塌形成典型砂质碎屑流和浊流沉积[图 6(a)],湖底扇规模大、砂体厚,同时被半深湖—深湖相优质烃源岩包围,加之盆内断层疏导,将是有利的岩性油气藏和构造-岩性油气藏发育区^[38]。

(3) 研究区目的层震积岩可以作为较好的储层类型,表现在:①地震作用产生的微裂缝、阶梯状断层和小型断层沟通了原有孔隙,使其渗透率大大增加,不但可以作为油气运移通道,同时可以储存油气^[35];②地震作用产生的各种类型的液化砂岩脉将非渗透的泥岩夹层刺穿,形成彼此联通的网状砂岩,更有利于油气在薄层砂岩中的赋存^[64];③地震作用带一般为应力集中带,具有较高的温度和压力,因此将有利于烃类的生成和排放,同时地震带为热水活跃带,将加速水-岩反应从而改变储层条件^[2];④地震作用产生的震裂角砾岩也是油气的良好储集体^[65]。统计研究区震积岩的物性和生产动态资料发现,震积岩中确实发现有油气的存在,有些井的产量还相当可观(表 2)。

表2 辽河西部凹陷南段沙三段震积岩物性和含油气性特征
Table 2 Physical characteristics and oiliness of seismites in Member 3 of Shahejie Formation in south section of western sag, Liaohe depression

井名	深度/m	物性		备注
		孔隙度/%	渗透率/mD	
双225井	4120	7.6	0.35	灰色荧光细砂岩
双深3井	2861	11.0	45.00	产气量 10806 m ³ /d
双216井	2761	21.6	8.69	解释油层
	2687	15.9	5.12	解释低产油层
双52井	3019	11.2	3.00	解释水层
	2933	10.8	2.00	解释水层
欢640井	2744			产油量 35.8 t/d, 产水量 1.8 m ³ /d
齐72井	2841	10.8	0.80	产油量 0.12 t/d
齐123井	3193	13.6	0.90	产油量 18.7 t/d, 产气量 3500 m ³ /d
齐231井	2739	11.0	0.62	产油量 2.1 t/d, 产气量 11536 m ³ /d
齐233井	2567	10.9	1.20	产水量 1 m ³ /d

许多学者在世界范围内发现地震引起油气动态发生明显变化的实例^[66]。在中国松辽盆地、辽河拗陷、济阳拗陷、鄂尔多斯盆地、柴达木盆地、准格尔盆地等大型含油气盆地中均发现了不同规模的震积岩的存在,这将引发思考:地震作用是否和大型含油气盆地之间存在必然的因果联系?

还有一个问题值得考虑,在研究区沙三段深层(>3500 m)储层已普遍致密,除原始沉积物性质、压实和胶结等成岩作用因素以外,地震作用也可能是储层致密的另外一个促发因素。相同的例子出现在鄂尔多斯盆地延长组,延长组普遍发育震积岩,埋深在1000 m时储层已致密,地震剪切作用导致原始沉积颗粒重新排列,颗粒间堆积更加紧密,从而使砂岩孔隙度和渗透率降低,但仍可作为油气储集层。

5 结论与讨论

(1) 辽河西部凹陷南段古近纪沙三段沉积期处于盆地深陷期,强烈的构造活动导致地震频发产生震积岩,其代表性沉积构造有:微断层和地裂缝、液化砂(砾)岩脉、震动液化卷曲变形、环状层理、负载构造、震积角砾岩和震油积岩等。其中液化砂岩脉和震积角砾岩是主要类型。

(2) 研究区震积岩垂向序列划分为阶梯状断层段、液化砂岩脉层段、液化卷曲变形层段、震裂岩和自碎角砾岩层段、震塌岩和内碎屑副角砾岩层段、震油积岩层段6个部分。

(3) 震积岩研究有助于恢复古构造演化史和寻找岩性油气藏及构造-岩性油气藏;微断层、地裂缝和液

化砂岩脉有利于改善储层条件,地震流体可促进烃源岩演化和成岩作用,同时震裂角砾岩本身也是良好的储层。

(4) 对于震积岩的研究应注意反演与正演结合,同时考虑以下问题:不同地震能量与震积构造之间的定量关系;考虑到不同物质组成、流变学性质和固结形态沉积物的地震响应特征。

参 考 文 献

- [1] 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.
Du Yuansheng, Han Xin. Seismo-deposition and seismities[J]. Advance in Earth Sciences,2000,15(4):389-394.
- [2] 吴勘. 震积岩、海啸岩、震浊积岩研究进展[J]. 地质学报,2010,30(2):136-139.
Wu Kan. Advances in research for seimite, tsunamite and seimoturbidite[J]. Acta Geologica Sinica,2010,30(2):136-139.
- [3] 戴朝成,郑荣才,朱如凯,等. 四川类前陆盆地须家河组震积岩的发现及其研究意义[J]. 地球科学进展,2009,24(2):172-180.
Dai Chaocheng, Zheng Rongcai, Zhu Rukai, et al. The discovery and significance of seismites from Xujiahe Formation in Sichuan analogous foreland basin[J]. Advances in Earth Science,2009,24(2):172-180.
- [4] Seilacher A. Fault-graded beds interpreted as seismites[J]. Sedimentology,1969,13(1/2):155-159.
- [5] Heezen B C, Ewing M. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks earthquake[J]. American Journal of Science,1952,250:849-873.
- [6] McKee E D, Goldberg M. Experiments on formation of contorted structures in mud[J]. Geological Society of America Bulletin,1969,80(2):231-244.
- [7] Sims J D. Determining earthquake recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments[J]. Tectonophysics,1975,29(1/4):141-152.
- [8] Shanmugam G, Walker K R. Anatomy of the middle Ordovician Sevier Shale Basin, eastern Tennessee[J]. Sedimentary Geology,1983,34(4):315-337.
- [9] Mutti E, Lucchi F R, Seguret M, et al. Seimoturbidite: a new group of resedimented deposits[J]. Marine Geology,1984,55(1/2):103-116.
- [10] Seilacher A. Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events[J]. Marine Geology,1984,55(1/2):1-22.
- [11] Pratt B R. Tepees in peritidal carbonates; origin via earthquake-induced deformation, with example from the Middle Cambrian of western Canada[J]. Sedimentary Geology,2000,153(3):57-64.
- [12] McLaughlin P I, Brett C E. Eustatic and tectonic control on the distribution of marineseismites; examples from the Upper Ordovician of Kentucky, USA[J]. Sedimentary Geology,2004:165-192.
- [13] Fernandes A L, de Castro A B, Basilici G. Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru

- Basin, Brazil[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 199(1/2): 51-64.
- [14] 宋天锐. 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[J]. *科学通报*, 1988, 33(8): 609-611.
Song Tianrui. A set of possible earthquake-tsunami sequences of a Beijing Ming tombs Precambrian carbonate formation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1988, 33(8): 609-611.
- [15] 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 等. 碳酸盐岩振动液化地震序列[J]. *地质学报*, 1994, 68(1): 16-34.
Qiao Xiufu, Song Tianrui, Gao Linzhi, et al. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(1): 16-34.
- [16] 乔秀夫. 中国震积岩的研究与展望[J]. *地质论评*, 1996, 42(4): 317-320.
Qiao Xiufu. Study of seismites of China and its prospects[J]. *Geological Review*, 1996, 42(4): 317-320.
- [17] 乔秀夫, 李海兵, 高林志. 华北地台震旦纪早古生代地震节律[J]. *地学前缘*, 1997, 4(3/4): 155-160.
Qiao Xiufu, Li Haibing, Gao Linzhi. Sinian-early paleozoic seismic rhythms on the North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(3/4): 155-160.
- [18] 乔秀夫, 高林志. 华北中新元古代及早中生代地震灾变事件及与Rodinia的关系[J]. *科学通报*, 1999, 44(16): 1753-1758.
Qiao Xiufu, Gao Linzhi. Relationship between the earthquake disaster events and Rodinia of the early Mesozoic and Neoproterozoic in north China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(16): 1753-1758.
- [19] 乔秀夫, 高林志, 彭阳, 等. 古庐带沧浪铺阶地震事件、层序及构造意义[J]. *中国科学: D辑*, 2001, 31(11): 911-918.
Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Peng Yang, et al. Significance of surging waves spread seismic, sequence and tectonic in Tanlu zone[J]. *Science in China: Series D*, 2001, 31(11): 911-918.
- [20] 乔秀夫. 中朝板块元古宙板内地震带与盆地格局[J]. *地学前缘*, 2002, 9(3): 141-149.
Qiao Xiufu. Intraplate seismic belt and basin framework of sino-korean plate in proterozoic[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(3): 141-149.
- [21] 乔秀夫, 高林志. 燕辽裂陷槽中元古代古地震与古地理[J]. *古地理学报*, 2007, 9(4): 337-352.
Qiao Xiufu, Gao Linzhi. Mesoproterozoic palaeoearthquake and palaeogeography in Yan-Liao Aulacogen[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(4): 337-352.
- [22] 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.
Qiao Xiufu, Li Haibing. Pillow, ball-and-pillow structures; Paleoseismic records within strata[J]. *Geological Review*, 2008, 54(6): 721-730.
- [23] 乔秀夫, 李海兵. 沉积物的地震及古地震效应[J]. *古地理学报*, 2009, 11(6): 593-610.
Qiao Xiufu, Li Haibing. Effect of earthquake and ancient earthquake on sediments[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(6): 593-610.
- [24] 杜远生, 张传恒, 韩欣. 滇中元古代昆阳群的地震事件沉积及其地质意义[J]. *中国科学: D辑*, 2001, 31(4): 283-289.
Du Yuansheng, Zhang Chuanheng, Han Xin. Earthquake deposits and its geological significance in proterozoic of Yunnan Kunming[J]. *Science in China: Series D*, 2001, 31(4): 283-289.
- [25] 杜远生, 彭冰霞, 韩欣. 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[J]. *沉积学报*, 2005, 23(2): 203-209.
Du Yuansheng, Peng Bingxia, Han Xin. Syn-depositional deformation structures by earthquake related to volcanic activity of the late Pleistocene in Weizhou island, Beihai city, Guangxi[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(2): 203-209.
- [26] 杜远生, Shi G, 龚一鸣, 等. 东澳大利亚南悉尼盆地二叠系与地震沉积有关的软沉积变形构造[J]. *地质学报*, 2007, 81(4): 511-518.
Du Yuansheng, Shi G, Gong Yiming, et al. Permian soft-sediment deformation structures related to earthquake in the southern Sydney Basin, Eastern Australia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 511-518.
- [27] 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): 581-590.
Du Yuansheng. Discussion about studies of earthquake event deposit in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(6): 581-590.
- [28] 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[J]. *地球科学*, 1994, 19(6): 845-850.
Liang Dingyi, Nie Zetong, Song Zhimin. A Re-study on seismite and Seismo-Unconformity; taking Western Sichuan and Yunnan as an example[J]. *Earth Science*, 1994, 19(6): 845-850.
- [29] 魏垂高, 张世奇, 姜在兴, 等. 塔里木盆地志留系震积岩特征及其意义[J]. *地质学报*, 2007, 81(6): 827-834.
Wei Chuigao, Zhang Shiqi, Jiang Zaixing, et al. Character and significance of Silurian seismite in the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(6): 827-834.
- [30] 张传恒, 武振杰, 高林志, 等. 华北中元古界雾迷山组地震驱动的软沉积物变形构造及其地质意义[J]. *中国科学: D辑*, 2007, 37(3): 336-343.
Zhang Chuanheng, Wu Zhenjie, Gao Linzhi, et al. Soft sediment deformation structure by earthquake and its geological significance in Mesoproterozoic mishan group of Huabei[J]. *Science in China: Series D*, 2007, 37(3): 336-343.
- [31] 何碧竹, 乔秀夫, 许志琴, 等. 塔里木盆地满加尔坳陷及周缘晚奥陶世古地震记录及其地质意义[J]. *地质学报*, 2010, 84(12): 1805-1816.
He Binzhu, Qiao Xiufu, Xu Zhiqin, et al. Late Ordovician Paleoseismic records of the Manjianer Depression and adjacent areas in Tarim basin, Xinjiang, and its geologic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(12): 1805-1816.
- [32] 吴贤涛, 尹国勋. 四川峨眉晚侏罗世湖泊沉积中震积岩的发现及其意义[J]. *沉积学报*, 1992, 10(3): 19-24.
Wu Xiantao, Yin Guoxun. Features and significance of seismites from upper Jurassic lacustrine deposits of Emei, Sichuan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(3): 19-24.
- [33] 钟建华, 王德金, 李佳, 等. 塔拉哈-齐家地区下白垩统震积岩特征及其油气储集问题[J]. *地质找矿论丛*, 2011, 26(3): 304-310.

- Zhong Jianhua, Wang Dejin, Li Jia, et al. Characteristics of cretaceous seismite in the Talaha-Qijia area and its significance[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2011, 26(3): 304-310.
- [34] 江胜国, 钟建华, 杨玉芳. 松辽盆地古龙凹陷姚家组震积岩研究[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(3): 292-295.
- Jiang Shengguo, Zhong Jianhua, Yang Yufang. Study of Yaojia seismite in Gulong Sag of Songliao Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(3): 292-295.
- [35] 杨剑萍, 聂玲玲, 张琳璞, 等. 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[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 805-812.
- Yang Jianping, Nie Lingling, Zhang Linpu, et al. Reservoir characters and paleoseismic records in Neogene Wunan Oilfield, southwestern margin of the Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 805-812.
- [36] 杨剑萍, 聂玲玲, 杨君. 柴达木盆地西南缘新近系与地震沉积有关的软沉积物变形构造及其地质意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 967-974.
- Yang Jianping, Nie Lingling, Yang Jun. Soft-sediment deformation structures of Neogene related to earthquake and its geological significance in the southwestern margin of Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(6): 967-974.
- [37] 石亚军, 陈武杰, 曹正林, 等. 柴达木盆地西南区震积岩的发现及其引发的勘探启迪[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1178-1187.
- Shi Yajun, Chen Wujie, Cao Zhenglin, et al. Discovery of seismites in the Southwestern Qaidam Basin and its significance for exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8): 1178-1187.
- [38] 陈武杰, 袁静, 李红哲, 等. 柴达木盆地西南区震积作用及其研究意义[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 230-237.
- Chen Wujie, Yuan Jing, Li Hongzhe, et al. Seismic deposition in Southwestern Qaidam Basin and its implication[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 230-237.
- [39] 陈世悦, 袁文芳, 鄢继华. 济阳拗陷早第三纪震积岩的发现及其意义[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 377-384.
- Chen Shiyue, Yuan Wenfang, Yan Jihua. Discovery and significance of earthquake event deposits of early tertiary in the Jiyang depression[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(3): 377-384.
- [40] 杨剑萍, 王辉, 陈世悦, 等. 济阳拗陷古近系震积岩特征[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 281-287.
- Yang Jianping, Wang Hui, Chen Shiyue, et al. The features of seismite in Jiyang Sub-Basin, Paleogene[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 281-287.
- [41] 袁静. 山东惠民凹陷古近纪震积岩特征及其地质意义[J]. 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[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 41-46.
- [42] 袁静, 陈鑫, 田洪水. 济阳拗陷古近纪软沉积变形层中的环状层理及成因[J]. 沉积学报, 2006, 24(5): 666-671.
- Yuan Jing, Chen Xin, Tian Hongshui. Formation of loop bedding in Jiyang Sub-basin, Paleogene[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5): 666-671.
- [43] 袁静, 陈鑫, 张善文. 济阳拗陷古近系软沉积变形层中的砂岩脉特征[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 336-340.
- Yuan Jing, Chen Xin, Zhang Shanwen. Characteristics of sand dikes in the Paleogene soft-sediments of Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 336-340.
- [44] 魏垂高, 张世奇, 姜在兴, 等. 东营凹陷现河地区沙三段震积岩特征及其意义[J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 799-805.
- Wei Chuigao, Zhang Shiqi, Jiang Zaixing, et al. Discovery and significance of seismite of Silurian in Member III at Shahejie Formation in Xianhe Area of Dongying Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 799-805.
- [45] 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.
- Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Chen Faliang, et al. Recognition and significance of seismites of the Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(4): 384-398.
- [46] 夏青松, 田景春. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组震积岩的发现及地质意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(2): 246-252.
- Xia Qingsong, Tian Jingchun. Characteristics and geological significance of seismites of the Yanchang formation, Upper Triassic, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(2): 246-252.
- [47] 李洁, 陈洪德, 林良彪, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组古地震效应及其地质启迪[J]. 地质论评, 2010, 56(4): 480-489.
- Li Jie, Chen Hongde, Lin Liangbiao, et al. Effect of ancient earthquake and its geological significance of upper Triassic Yanchang formation in southeast Ordos basin[J]. Geological Review, 2010, 56(4): 480-489.
- [48] 王化爱, 钟建华, 陈鑫, 等. 蒙古塔木察格拗陷白垩系震积岩特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1088-1094.
- Wang Huaai, Zhong Jianhua, Chen Xin, et al. Characteristics of Cretaceous seismite in the Tamuchage Depression, Mongolia, and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1088-1094.
- [49] 袁静. 中国震积作用和震积岩研究进展[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(1): 144-149.
- Yuan Jing. Research of seismic deposition and seismites of China[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2005, 29(1): 144-149.
- [50] 吕洪波, 章雨旭, 肖国望, 等. 内蒙古白云鄂博南东黑脑包腮林忽洞群下部发现地震滑塌岩块[J]. 地质论评, 2006, 52(2): 163-169.
- Lü Hongbo, Zhang Yuxu, Xiao Guowang, et al. Earthquake slump blocks discovered in lower part of the Sailinbudong Group, Heinaobao, Southeast Bayan Obo, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 2006, 52(2): 163-169.
- [51] 周勇, 纪友亮, 万璐, 等. 山东省胶莱盆地东北部下白垩统莱阳组震积岩特征及地质意义[J]. 古地理学报, 2011, 13(5): 517-528.
- Zhou Yong, Ji Youliang, Wan Lu, et al. Characteristics and geologic significance of seismites in the Lower Cretaceous Laiyang Formation in northeastern Jiaolai Basin in Shandong Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(5): 517-528.

- [52] 陈杰,周鼎武,杨仁超,等.辽河盆地东部凹陷震积岩发现及研究[J].特种油气藏,2007,14(4):44-48.
Chen Jie, Zhou Dingwu, Yang Renchao, et al. Quality follow-up and monitoring in precise seismic acquisition in Liaohe oil province[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2007, 14(4): 44-48.
- [53] 童亨茂,必荣三,于天才,等.渤海湾盆地辽河西部凹陷的走滑构造作用[J].地质学报,2008,82(8):1017-1025.
Tong Hengmao, Bi Rongsan, Yu Tiancai, et al. The strike-slip tectonics in the Western Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1017-1025.
- [54] 孙洪斌,张凤莲.辽河拗陷古近系构造-沉积演化特征[J].岩性油气藏,2008,20(2):60-65.
Sun Hongbin, Zhang Fenglian. Structural-sedimentary evolution characteristics of Paleogene in Liaohe Depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(2): 60-65.
- [55] 张震,鲍志东,童亨茂,等.辽河断陷西部凹陷沙三段沉积相及相模式[J].高校地质学报,2009,15(3):387-397.
Zhang Zhen, Bao Zhidong, Tong Hengmao, et al. Sedimentary facies and facies model of the 3rd member of Shahejie Formation in the western Sag, Liaohe fault basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(3): 387-397.
- [56] Owen G. Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sand and some ancient examples[J]. Sedimentology, 1996, 43(2): 279-293.
- [57] 鄢继华,陈世悦,姜在兴,等.断陷湖盆震积岩成因模拟实验[J].古地理学报,2007,9(3):277-282.
Yan Jihua, Chen Shiyue, Jiang Zaixing, et al. Simulating experiment on genesis of seismo-turbidites in rift lacustrine basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(3): 277-282.
- [58] 鄢继华,崔永北,陈世悦.几种常见震积岩相标志在模拟实验中的识别[J].沉积学报,2009,27(6):1131-1137.
Yan Jihua, Cui Yongbei, Chen Shiyue. Identification of common facies indicators of seismites in simulated experiments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1131-1137.
- [59] 李勇,钟建华,邵珠福,等.软沉积变形构造的分类和形成机制研究[J].地质论评,2012,58(5):829-838.
Li Yong, Zhong Jianhua, Shao Zhufu, et al. An overview of the classification and genesis of soft-sediment deformation structure [J]. Geological Review, 2012, 58(5): 829-838.
- [60] 王昌勇,郑荣才,高振中.准噶尔盆地侏罗统八道湾组震积岩的发现及其研究意义[J].地质论评,2008,54(6):821-826.
Wang Changyong, Zheng Rongcai, Gao Zhenzhong. The discovery and significance of seismites from the Lower Jurassic Badaowan Formation in Junggar Basin[J]. Geological Review, 2008, 54(6): 821-826.
- [61] Rodriguez Pascua M A, Calvo J P, De Vicente G, et al. 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 [J]. Sedimentary Geology, 2000, 135(1/4): 117-135.
- [62] Alfaro P, Moretti M, Soria J M. Soft-sediment deformation structures induced by earthquakes (seismites) in Pliocene lacustrine deposits (Guadix-Baza Basin, Central Betic Cordillera) [J]. Eclogae Geologicae Helveticae, 1997, 90: 531-540.
- [63] Spalletta C, Vai G B. Upper Devonian intraclast parabraconites interpreted as seismites [J]. Marine Geology, 1984, 55(1/2): 133-144.
- [64] Shanmugam G. Deep-water processes and facies models: implications for sandstone petroleum reservoirs [M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [65] 郭建华,王方平,刘贵,等.湘西大庸上震旦统灯影组震裂角砾岩[J].石油实验地质,1999,21(3):219-224.
Guo Jianhua, Wang Fangping, Liu Gui, et al. Shattered breccia of the upper sinian dengying formation in Dayong, west Hunan province [J]. Experimental Petroleum Geology, 1999, 21(3): 219-224.
- [66] 吴锦秀.地下水动力学前兆形成机制[C]//地下流体预报地震论文集.北京:地质出版社,1987:200-204.
Wu Jinxiu. Groundwater dynamics precursor formation mechanism [C] // Proceedings of underground fluid predict earthquakes. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 200-204.

(收稿日期 2013-09-25 改回日期 2013-12-22 责任编辑 熊英)