

文章编号:1009-2722(2015)04-0042-13

灵山岛沉积物软变形构造特征

周瑶琪^{1,2}, 张振凯^{1,2}, 许红^{3,4}, 王安东^{1,2}, 魏凯^{1,2,3,4}, 张云翠^{1,2},
王子阳^{1,2}, 李斗^{1,2}, 陈阳子^{1,2}, 刘扬^{1,2}, 于珊珊^{1,2}, 高晓军^{3,4}

(1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580;
2 中国石油大学地球化学与岩石圈动力学开放实验室, 青岛 266580;
3 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;
4 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:为了研究灵山岛的沉积物软变形构造特征,利用野外露头考察、沉积岩石学、地球化学等方法,根据形态学、驱动力、沉积物液化及变形机制等因素进行了深入分析。识别出多种类型沉积物软变形:卷曲变形、液化底辟、负载构造、挤入构造、液化角砾岩、球—枕构造、泄水构造,并详细描述了这些沉积物软变形的表面特征和分布规律。依据各种地质记录,本区构造活动频繁、附近的五莲—烟台断裂于早白垩世是最活跃的时期,认为本文所描述的沉积物软变形是由地震触发引起的。根据不对称负载构造受横向剪切力分析,验证了吕洪波^[1]推断早白垩世盆地古斜坡方向 SE 高 NW 低的观点。早白垩世巨厚白色凝灰岩可能系本区存在深切至下部岩浆囊的大断层所致,在这个深切过程中诱发一系列地震活动与沉积物的软变形。

关键词:灵山岛;早白垩世;沉积物软变形;液化;地震

中图分类号: P732 文献标识码: A DOI:10.16028/j.1009-2722.2015.04007

灵山岛地理位置处于山东省胶南市黄海海域,总面积 7.66 km²,海拔 513.6 m,是我国北方第 1 高岛。其距最近的陆地大珠山 9.8 km,距积米涯 16.7 km(图 1)。由于远离大陆,交通不便,过去鲜见有关灵山岛的地质考察文献。吕洪波^[1]首次报道了重要的灵山岛船厂剖面巨型滑塌构造,并认为此套滑塌层是地震触发形成的。笔者曾设想一次强地震触发形成这套巨型滑塌层前,

应有多次不同震级的地震发生。于是 2011 年以来,作者先后 8 次到岛上考察,在吕洪波^[1]确立的地震滑塌层之下的层位中找寻,发现其他层位大量发育地震触发形成的软沉积变形构造(soft-sediment deformation, 简写 ssd)。

1 地质背景

构造环境 灵山岛的构造大环境受扬子板块和华北板块碰撞控制,多条区域主断层近似 NE 向平行分布(图 1)。地层时代(>120 Ma)为晚侏罗世—早白垩世,正是扬子深俯冲地块快速折返至地表期。苏鲁造山带自早白垩世开始隆升^[2],灵山岛与其 NW 侧的五莲—烟台断裂直线距离约 40 km,五莲—烟台断裂(K₁)活动时间为早白垩世,与灵山岛震积岩形成时间空间很好的匹配。

收稿日期:2015-01-08

基金项目:中国地质调查局项目(GZH201200510);国家重点基础发展研究计划(973 计划)(2012CB956004);国家自然科学基金(40872095, 41272123);中央高校基本科研业务专项基金(15CX06011A)

作者简介:周瑶琪(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事地球化学、地球动力学及盆地沉积学方面的教学与科研工作。
E-mail:zhouyq@upc.edu.cn



图 1 灵山岛区域概况与地质简图
(灵山岛地质图部分数据据文献[6])

Fig. 1 The location and geological map of Lingshan Island
(part of the data from reference [6])

由图 1 得出,在五莲—烟台断裂另一侧,相邻的胶莱盆地中的莱阳群也发育典型的震积岩^[3,4]。

沉积环境 本区沉积岩主要由黑色炭质泥页岩和灰绿色砂岩互层构成,每套砂泥岩韵律层都具有较好的浊积岩鲍马序列,完整地层具有粗砂、中砂、细砂、泥岩、页岩的完整旋回,多层底部发育槽模、沟模、重荷模构造。大量滑脱层的发育表明沉积位于斜坡上,泥页岩含有大量植物碎屑、炭质条带等陆相指示物。现在初步推断为海相浊积岩,植物碎屑是浊流二次搬运的结果,应为浪基面以下深水斜坡浊积岩沉积环境。浊积岩是经常发现沉积物软变形的岩层^[5]。当时扬子/华北两大板块之间未完全拼合,之间存在条带状残余洋盆^[1]或弧后裂隙洋盆。

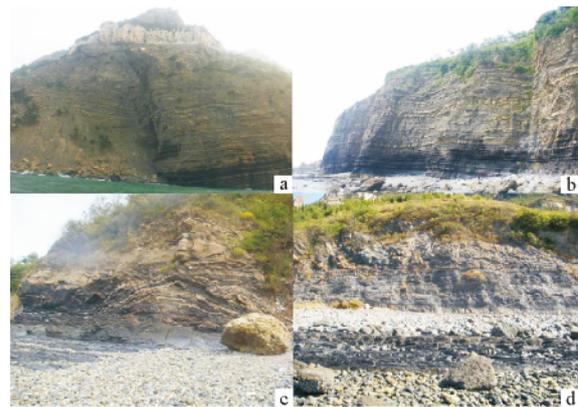
2 地层特征

作者乘船绕岛环形一周,发现一套白色火山凝灰岩沿海岸线分布稳定,于是采取了多剖面凝灰岩取样,利用锆石测年,得出其加权年龄同为 120 Ma,并且微组分相同,所以断定多处凝灰岩

为同一层位,将其定为本区域地层对比的标志层。根据凝灰岩 120 Ma 年龄厘定下部沉积地层为下白垩统莱山群,山东省第四地质矿产勘察院^[7]出版的山东区域地质也显示灵山岛由下部莱阳群法家莹组 (K_1f) 沉积岩和上部青山群八亩地组 (K_1b) 火山岩组成。

老虎嘴正下方剖面(图 2a)最为完整,但是地形险峻,不易观察。对照完整剖面 and 按与凝灰岩的关系,从上到下依次选取船厂滑塌剖面 ($35^{\circ}45.819N, 120^{\circ}09.408E; 110^{\circ} \angle 30^{\circ}$) (图 2c)、千层崖剖面 ($35^{\circ}44.613N, 120^{\circ}09.607E$; 北端挤压褶皱,地层 90° 直立,向北地层逐渐变为平缓) (图 2b) 和灯塔剖面 ($35^{\circ}44.697N, 120^{\circ}09.413E; 80^{\circ} \angle 40^{\circ}$) (图 2d) 为研究对象。

船厂和灯塔 2 个剖面以上部垂直剖面和下部近似水平海岸剖面组成。千层崖剖面直立,25 m 高,但北侧为一个挤压褶皱,斜向地层沿海岸展布。3 个剖面都沿海岸分布,高度适合观察,最重要的是 2/3 层位都受到高潮—低潮海水的来回冲刷,使得砂岩光滑洁净,每颗砂岩细小颗粒看得非常清楚,液化角砾岩、液化底辟、泄水构造等液化、流化现象能够清楚的识别。



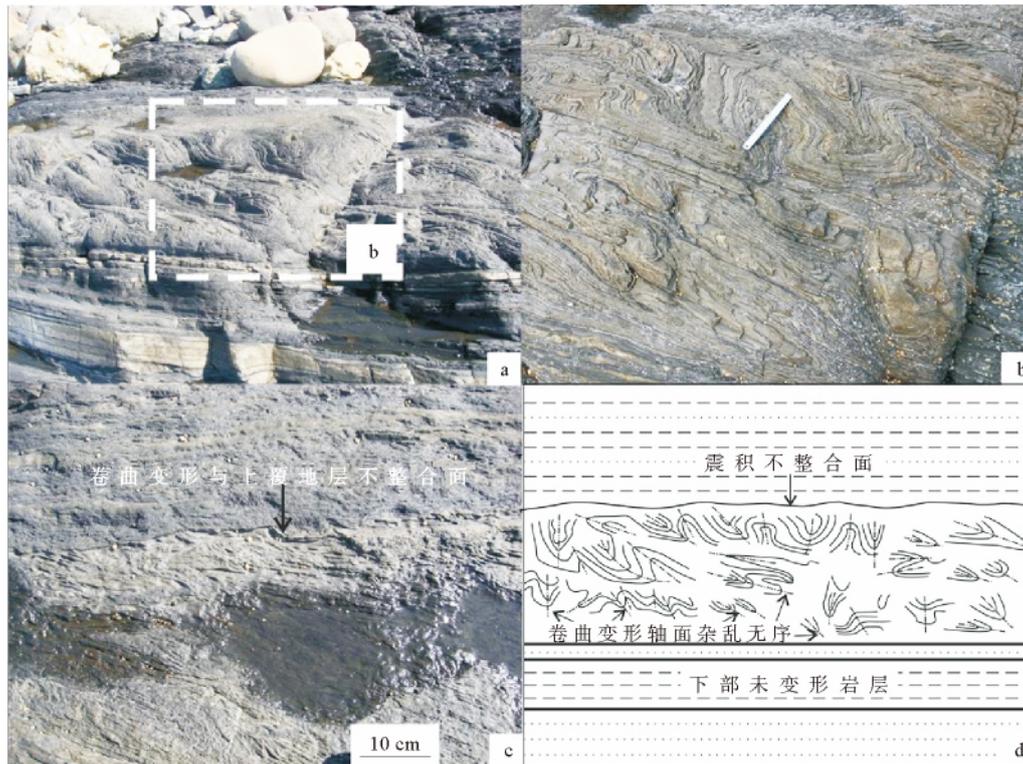
a 老虎嘴景点凝灰岩下方浊积岩岩层完整剖面;
b 千层崖剖面;c 船厂滑塌体剖面;d 灯塔剖面

图 2 宏观野外剖面

Fig. 2 Field Outcrops

3 沉积物软变形描述

根据形态学、驱动力、沉积物液流及变形机制等因素,本文识别出地震触发引起的多种类型沉积物软变形构造:卷曲变形、液化底辟、负载构造、



a 卷曲变形层与上下地层关系; b 卷曲变形, 参照物尺子 15 cm;
c 变形层与上覆地层的震积不整合面; d 卷曲变形素描图, 变形层轴面杂乱无序

图 4 卷曲变形

Fig. 4 Curled deformation

3.1 卷曲变形

低潮时, 灯塔剖面下部沿海岸出露 60 cm 厚卷曲变形构造层, 卷曲变形层有毫米级砂岩泥岩薄互层构成, 卷曲轴面杂乱无序, 由水平状到直立。下部地层未变形, 上覆地层为含大量植物碎屑和炭质条带的泥岩。地震后的海啸或洪水把大量植物携带至此沉积, 并且将变形层顶部参差不齐的褶皱侵蚀磨平, 不整合在变形层之上, 这个面称为震积不整合面^[8]。未固结的砂泥岩薄互层在地震时很容易发生卷曲变形。卷曲变形枢纽方向多变, 两侧不协调, 表明不但垂向上受重力负载作用, 平面上还受到挤压应力。

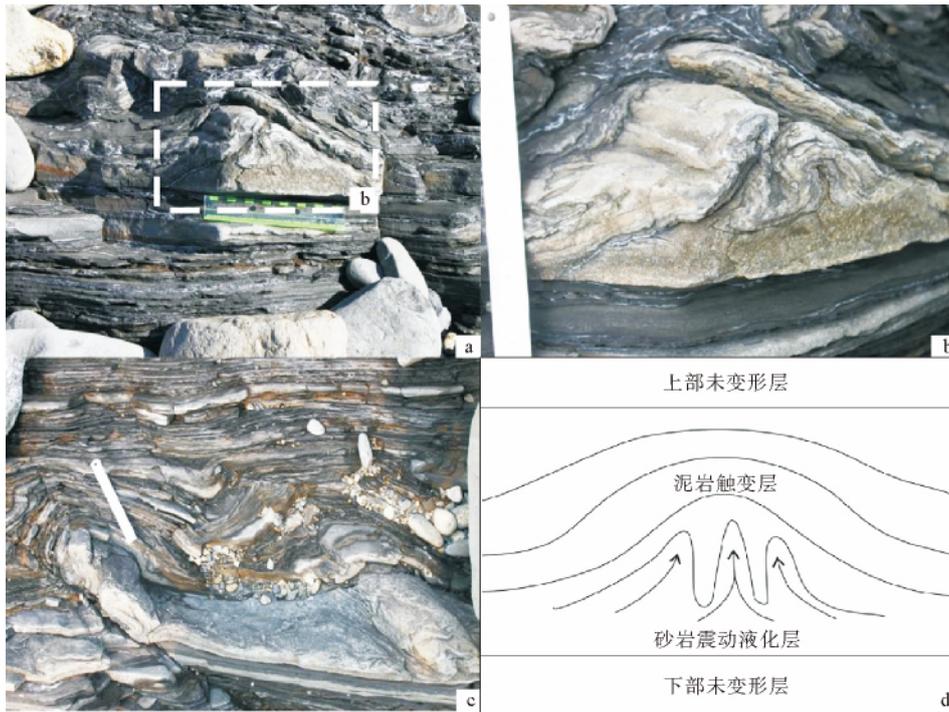
3.2 液化底辟

在多层位识别出不同规模的底辟构造, 灯塔剖面海岸水平段顶部液化底辟构造最为典型。液化底辟层分为下部砂岩上部泥页岩, 下部砂岩液化向上挤入塑性泥岩中, 底辟构造呈锥形、蘑菇形

及柱形(图 5), 不是单个出现, 沿地层发现多个不同类型底辟。图 5 底辟层高度约 10 cm, 规模虽然较小, 但是液化和向上挤入现象非常明显(图 5b)。塑性泥岩受到砂岩上拱的挤压力, 引起触变, 形成明显的弯曲变形。砂岩液化前, 颗粒支撑上覆压力, 地震引起液化后, 上覆压力转到孔隙流体上。此时液化流体产生异常压力, 水具有不可压缩性特征, 所以会向周围产生挤压力, 当向上挤压流动时形成底辟构造(图 5c)。

3.3 负载构造、挤入构造

负载构造是震积岩中最为常见的一种, 形成机制为沉积物软层的密度倒置^[9-11], 即上部地层密度大于下部地层密度, 本区常见上覆砂层下伏泥层组合, 少量上覆粗砂层下伏细砂层组合。软沉积变形上地层一般是未变形的水平层, 因为它是均一液化下颗粒充填或者下一期侵蚀、重新沉积的过程^[12]。灯塔剖面下部路边处有一连续 4 层 80 cm 厚负载构造层, 变形层岩性与上下未变



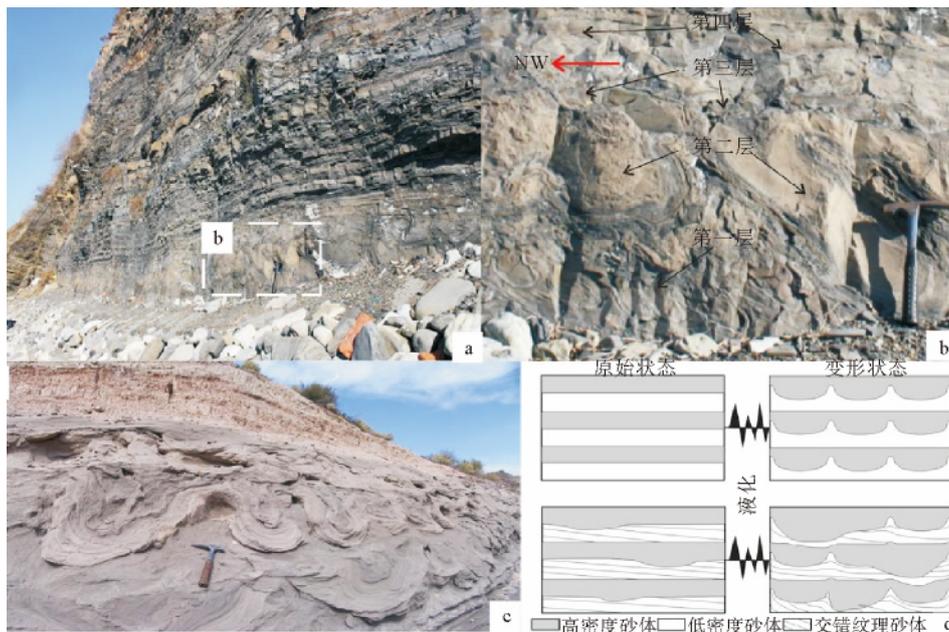
a、b 锥形底辟, 比例尺 15 cm; c 柱状形和蘑菇形底辟; d 液化底辟示意图

图 5 底辟构造

Fig. 5 Liquefied diapir

形层的相近, 每层厚度变化大, 每层之间的接触面都是弯曲变形的(图 6), 因此推断整个厚层变形

是由一次强地震引起的。这个现象与 Moretti^[12]报道的内乌肯盆地(北巴塔哥尼亚, 阿根廷)沉积



a 多层负载构造层; b 局部放大, 4 层负载构造, 第 2 层最厚, 占主导; c 内乌肯盆地一次地震形成多层负载构造野外露头及示意图^[12]; d 多层负载形成示意图^[12]

图 6 多层负载构造

Fig. 6 Multilayer load structure

物软变形负载构造基本相同(图 6), Moretti 详细阐述了它的形成机理, 逐个排除了所有可能的触发机制, 认为最合理地解释为地震引起的。

图 6、7 观察到负载构造具有明显的不对称性, 厚层负载构造层中下部 2 层负载体有方向性, 都向 NW 向倾斜, 也证明当时斜坡东南高西北低, 先由一次强震引起负载变形, 后又受到沿斜坡

的拖拽力而形成。Morreti^[5] 利用露头 and 实验讨论了浊积岩中的不对称枕状构造, 提出成因主要依靠 2 大驱动力(垂向不稳定的反密度梯度和横向剪切力), 并认为区域性斜坡产生的横向剪切力是造成不对称负载体和火焰构造向某一方向倾斜排列的最合理解释^[13-15]。

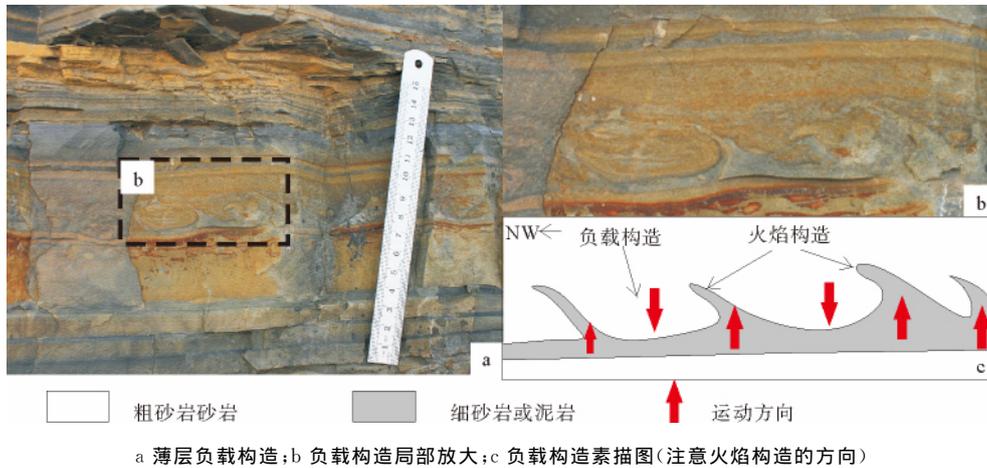


图 7 负载构造及火焰构造

Fig. 7 Load structure and flame structure

其他负载构造以单层为主, 负载层顶面平直, 沉降中心变厚, 两侧拉伸减薄, 下表面形成圆润“凹”型。不同层位负载构造规模变化大, 负载构造宽 5~100 cm, 厚 1~30 cm, 同一层位的变化不大。多个薄层不对称负载构造指示受到 SE—NW 向横向剪切力作用, 证明存在区域古斜坡, 并且东南高, 西北低。如图 7 所示, 灯塔剖面有一层厚 2 cm 宽 5 cm 的不对称负载构造, 上部向 NW 倾斜, 伴生的火焰状挤入构造尖端指向 NW。

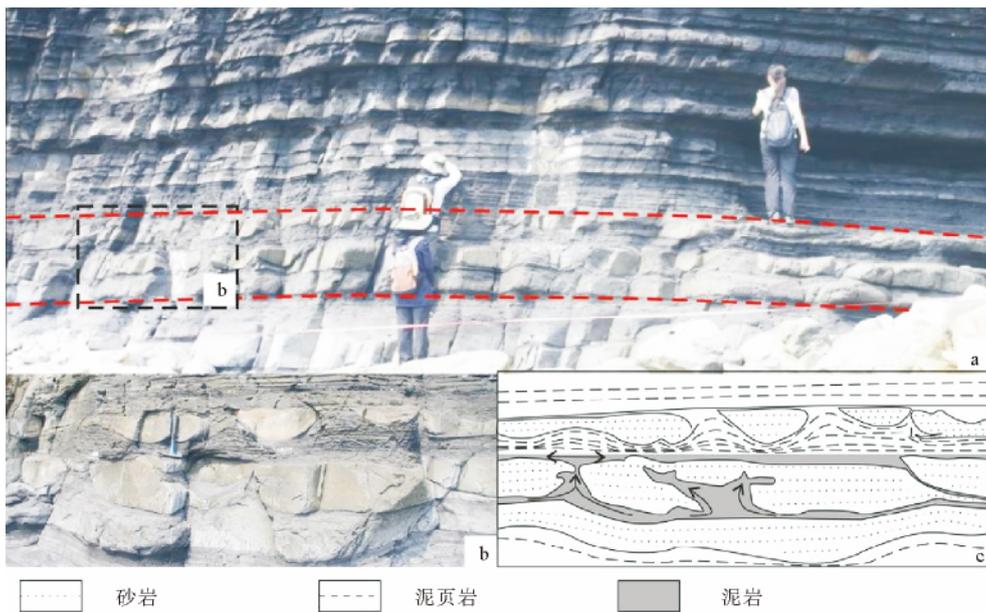
当泥岩含有纹层时, 纹层平行枕状下凹面, 变形最大处纹层被紧密压缩, 两侧逐渐变疏, 形成宽缓向形和背形(图 8)。泥岩向上挤入彻底分离负载层时, 称为完全变形枕状层。如图 8 所示, 千层崖剖面下部可见 3 层连续负载构造, 单层厚度在 30 cm 左右, 侧向追踪, 可见多处枕状砂岩层完全被下部泥岩挤入分开。3 个负载构造地层砂岩顶面平直, 与其接触的泥页岩底部纹层平行, 无变形现象, 说明每一层的负载变形对应一期地震事件。

下伏泥岩或粉砂岩被挤入相邻负载体之间的尖闭褶皱孔隙中, 形成挤入构造(flame structures

of Kelling and Walton^[16]; cusps of Owen^[13]), 挤入构造与负载构造伴生。Carlos M M 等^[17] 按挤入构造形态分为常规形、梯形、火焰状、X 形、尖峰形、穹顶形及多个符合形。本区挤入构造与负载构造伴生, 多种多样, 基本识别出所有 Carlos M M 划分的 7 种类型。Vanneste K^[18] 提出突然向上的流体压力形成的火焰构造是地震触发引起的有利证据。

3.4 液化角砾岩、砂岩脉

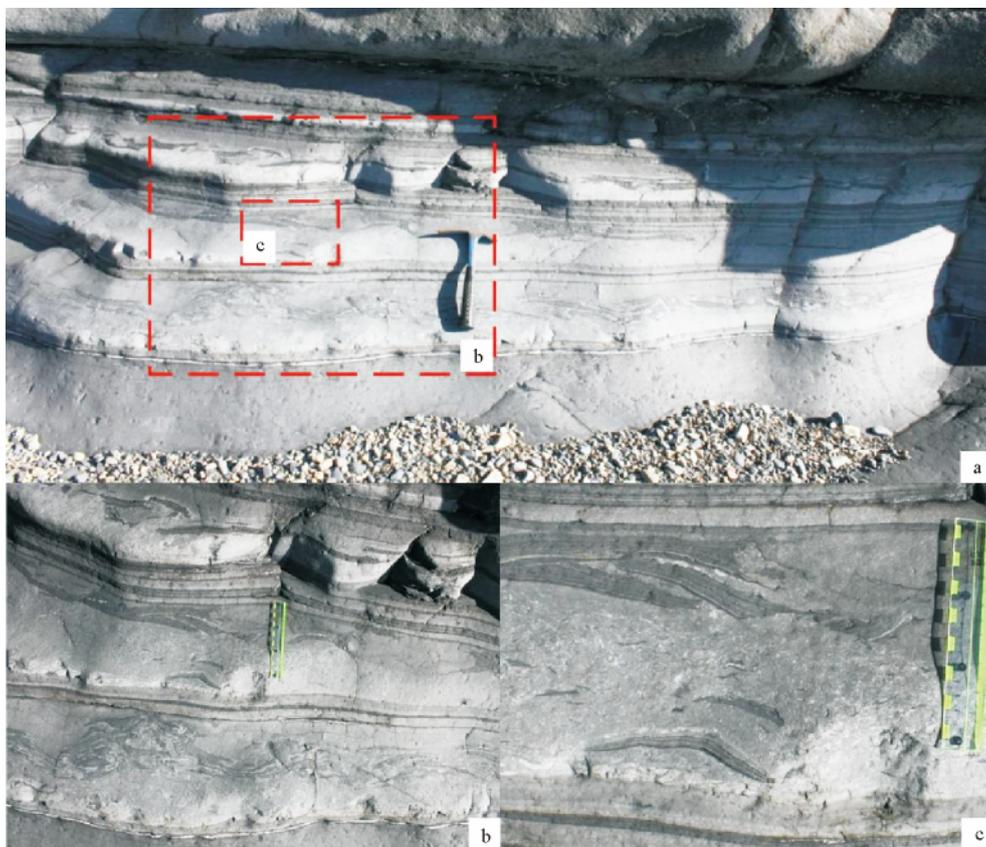
液化角砾岩、液化均一层及砂岩脉都是砂岩液化后侵入其他未液化层位时形成的, 所以往往两者或三者共生。层内可以清晰识别出这 3 种类型的变形构造。千层崖中部、底部各连续发育 3 层软变形层, 每一层的上下层位都是未变形薄层泥砂岩, 每层软沉积变形代表发生一次地震事件。泥质角砾岩颜色发暗, 呈灰黑色, 砂岩灰白色, 两者极易区分。泥质角砾岩棱角分明, 带着毛刺, 无分选性(几毫米至十几厘米), 表现出未经搬运的特征(图 9), 个别断面齐整的相临角砾岩顺层可



a 千里岩底部厚层负载全景; b 负载构造局部局部放大; c 素描图

图 8 千层崖下部厚层负载构造

Fig. 8 Thick layer load structure



a 三层液化角砾岩, 每层之间由未变形层分割; b、c 局部放大, 暗色物质为泥质角砾石或泥质条带, 比例尺 15 cm 长;

c 暗色泥质角砾岩无分选, 粒度由几毫米至十几厘米; 顶部 1 cm 厚为分选极好灰白色液化均一层

图 9 液化角砾岩

Fig. 9 Liquefied breccia

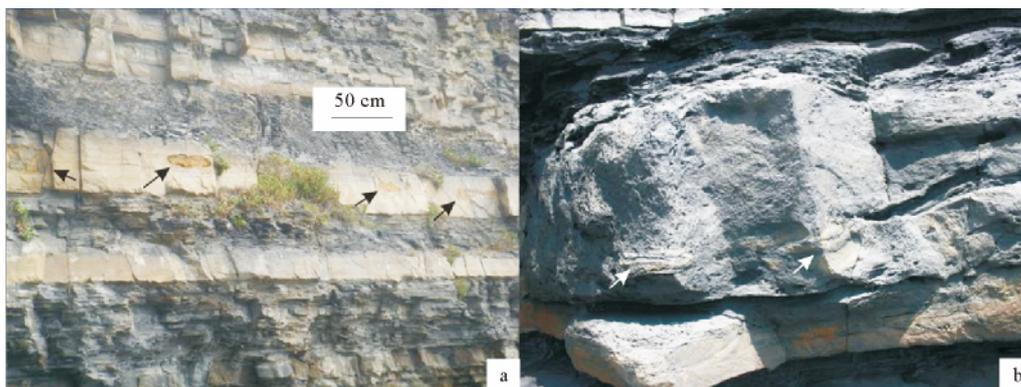
以拼接,呈顺层或排骨式排列。砂层震动液化后,多方向侵入,流动侵位过程冲断、撕裂薄层砂岩泥岩条带,形成液化角砾岩。

图 9c 变形层顶部有一薄层砂岩,分选好,层面平滑,内部无牵引流沉积构造,符合液化均一层特征^[19]。砂岩脉非常常见,是指液化砂岩挤入其他层位或充填裂缝形成脉状构造。液化砂岩多方位的侵入造成此处砂岩脉有水平状、倾斜状和直立状,规模从几厘米至十几厘米不等。

3.5 球—枕构造

前人详细阐述了球—枕构造的形成机理和形

成条件^[9,20]。本区 3 个剖面多个层位都大量发育球—枕构造,同其他地震软变形一样,球—枕构造不会单个孤立出现,每层顺走向追踪都会发现有规律出现多个(图 10)。以扁平椭球体为主,长轴顺层展布,规模在 5~30 cm,长轴/短轴在 2~3 之间,Morreti^[21]通过野外统计发现,球—枕构造长轴与短轴比与沉降深度有关,下降越深,球—枕构造越扁平。本区球—枕构造多为粗砂岩沉入液化细砂粉砂岩,上层母岩已完全消失,差异风化使其非常容易识别。Kuenen P H^[22]通过实验证明枕状构造是不断震动形成的;Nichols 等^[23]通过实验研究了砂火山、枕状构造及碟状构造的成因。



注:箭头所指为球—枕构造

图 10 球—枕构造

Fig. 10 Ball-pillow structures

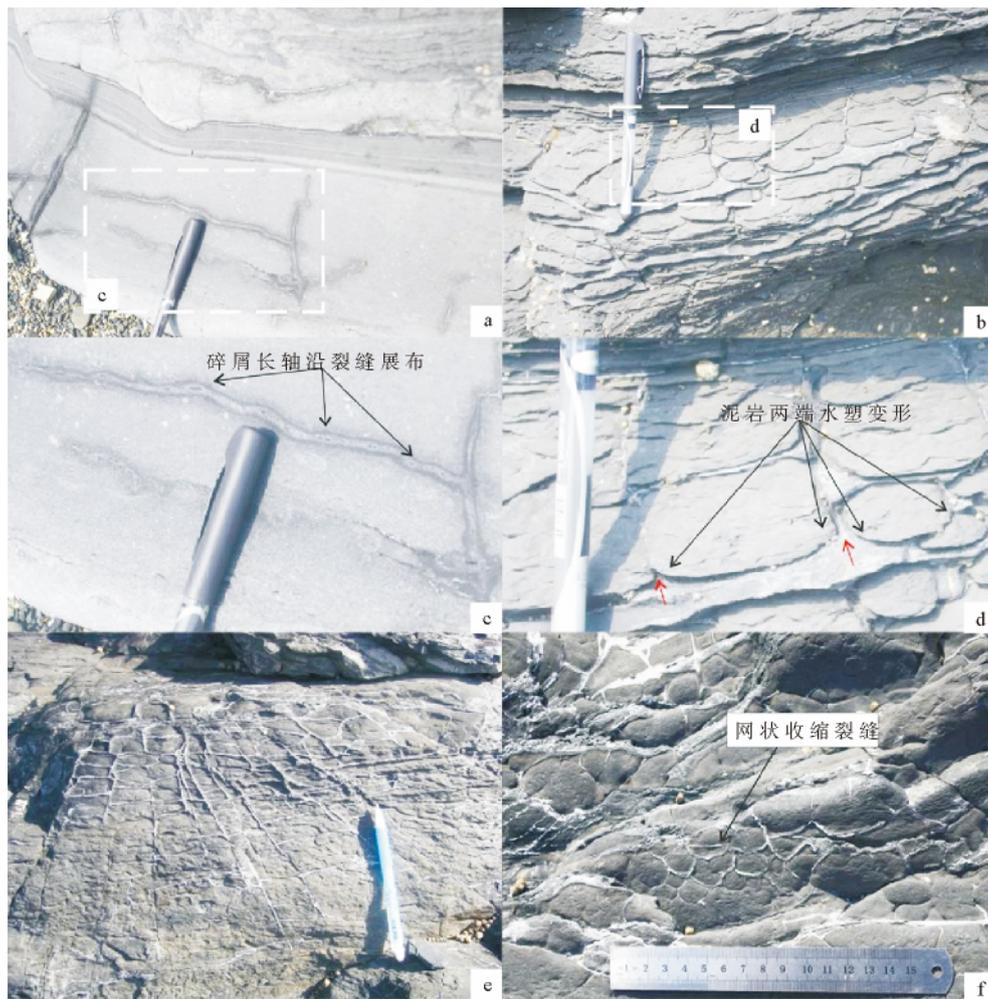
3.6 泄水构造

泄水构造多出现在细砂岩、黑色泥岩中,平面上为不规则多边形,像龟裂纹;垂直方向下部砂岩液化,向上方泥岩呈细脉状侵入,最后穿透至泥岩顶面完成泄水。垂向泄水砂岩脉中间泥岩两端向上翘起,总体呈现向形,乔秀夫^[10]称为碟状构造。泄水构造由垂向裂缝和顺层裂缝组成(图 11b、d),在厚层泥岩中还可以发育多组顺层裂缝,总体呈网状结构。在千层崖岸边厚层泥质细砂岩中的常见长条形泄水构造,1~5 mm 宽,10~30 cm 长,内部泥质含量高,砂岩碎屑长轴沿泄水构造展布,具有明显的流动痕迹,两侧发现有溶蚀现象(图 11a、c)。

泥岩水下泄水容易形成收缩裂缝^[24-26]。泥岩

收缩产生的泄水构造与碟状构造原理不同,大多数充填方解石或无充填,裂缝宽度窄,明显小于砂岩泄水产生的碟状构造。很多泥岩的泄水构造初次未被发现,涨潮时海水将其润湿,裂缝吸水量大,沿裂缝颜色明显变深后才被发现,泄水构造规模相差较大,缝宽<3 mm,长度变化大。泥岩裂缝同样由顺层和垂向 2 组裂缝组成,局部可以看出裂缝形成过程(图 11e、f)。

泥岩自身泄水构造形成的裂缝仅限于层内,形状不规则网状结构,与干裂形成的龟裂纹和构造裂缝有明显区别。正常情况下,含饱和水泥岩排水速率与上覆沉积物和水体压实达到平衡,内聚力处于裂缝将要开裂的临界值。地震产生的振动打破了这个平衡,泥岩加速了脱水,体积减小速率大于压实效应,形成了收缩微裂缝。Tanner^[27]



a、c 砂岩泄水构造；b、d 碟状泄水构造，d 中红色箭头示小型向上泄水，黑色箭头示被向上方的牵引构造（水塑变形）；e 网状收缩裂缝侧面；f 网状收缩裂缝顶面

图 11 泄水构造

Fig. 11 Water escape structure

发现泥岩在压实阶段也能形成裂缝，指出地震促进了网状裂缝发育；Brian 深入地研究了泥岩结核中的网状裂缝，发现其成因可能确与地震有关，而不是暴露形成的干裂。

4 分布特征

区域性上，灵山岛全区 7 km^2 的面积，各剖面都有软沉积变形发现，说明在相当广的范围内都存在软沉积变形构造；纵向重复性上，纵向 70 m 厚的地层识别出至少 50 层软沉积变形，不乏多地层连续发育，多种类多次重复出现；横向连续性上，每一种变形都不是单独出现，而是沿相同地层

有规律多个连续出现。本区的沉积物软变形都局限在特定层位中，上下层位都是未变形层，与后期构造变形区别明显。综上所述，灵山岛的软沉积变形构造垂向多种类、多层位密集发育，侧向一定距离内持续多次出现。

5 动力学分析

沉积物软变形构造驱动力主要有：自身重力、反密度梯度、横向剪切力、沉积物液化底辟及沉积物泄水。通过总结发现砂岩为主动变形层，泥岩为被动变形层。存在反密度梯度时，自身重力起到主要作用，上部密度大的岩层落入下部密度小

的岩层,形成负载构造。下部密度小的岩层被挤压变形,沿负载构造向上弯曲的两侧挤入上部岩层,称为挤入构造(火焰构造)。存在斜坡时,沿斜坡方向具有横向剪切力分量 τ ,形成一系列不对称负载构造(图 12)。图 12 的动力学分析解析了图 6、7 所示的不对称负载构造形成过程,证实早

白垩世盆地存在斜坡,支持吕洪波^[1]的古斜坡方向东南高西北低的结论。细砂岩容易液化,液化流体具有异常高压,向四周低应力方向挤入。通常上覆泥岩层应力低,形成向上流动的底辟构造。泥岩不能液化,但具有触变特性,配合砂岩形成多种沉积物软变形构造。

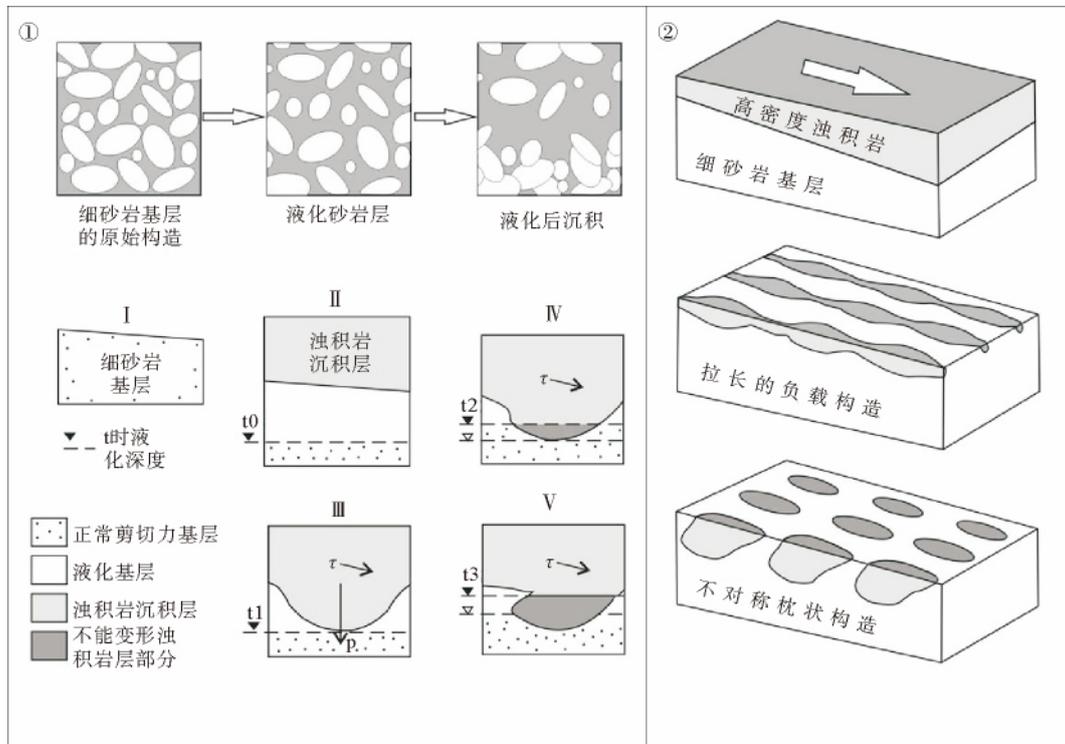


图 12 不对称负载构造形成示意图(据文献[5]修改)

Fig. 12 Asymmetrical the load structure formation schematic diagram (modified from reference [5])

6 触发机制

除地震外,多种因素可能引起软沉积变形,比如快速堆积、流水、波浪、海啸,所以人们一直研究判别地震引起的软沉积变形构造的标志^[28-35],乔秀夫^[36]认为最终确定是否是震积岩要详细了解区域构造背景。Owen 和 Morreti^[37]总结了震积岩的 6 大特征:①区域分布广泛;②横向连续性;③纵向重复性;④可对比性;⑤区域内有活动断层;⑥变形规模和频率与距离断层的距离有关^[38]。根据本区沉积物软变形表面特征及分布规律,对比以上前人总结的震积岩特点,确定是由地震引起的沉积物软变形构造。如图 1 所示,区

域主断层以 NE 向为主,NW 向断层为辅,五莲—烟台断裂、青岛—海阳断裂及千里岩断裂是控盆主断裂。灵山岛与五莲—烟台断裂直线距离约 40 km,引起沉积物软变形的震级约为 6.5~7 Ms,诱发滑塌地震大于 7 Ms。灵山岛与青岛—海阳断裂直线距离小于 20 km,6~7 Ms 地震都可以诱发沉积物软变形,沿青岛—海阳断裂带分布火山岩,推断断裂带的地震诱发火山喷发。灵山岛地层记录的地震事件 >50 次,5 Ms 地震才能沉积物软变形^[29,39],加上更多次的未引起软沉积变形 5 Ms 地震,表明在早白垩世灵山岛地区地震活动频繁。

7 火山凝灰岩

顶部巨厚的白色火山凝灰岩底部具有舌状流动构造, 锆石测年结果显示为 120 Ma, 为早白垩世喷发。凝灰岩与大珠山、小珠山和崂山岩浆岩年龄相近, 但是组分略有不同, 推断当时沿海岸线存在一个大断裂。高频率、高震级的地震不断发生, 使得断裂带下切至深部岩浆囊, 导致最后地震火山的喷发。早白垩世青山期沿断裂带火山强烈喷发, 灵山岛残余安山质火山岩厚度 > 400 m。安山质火山岩分布位置、时代、岩石组分类似于著名的环太平洋安山流纹岩带, 认为这个大断裂属于环太平洋构造域。下一步将深入研究灵山岛的震积岩与环太平洋构造域活动关系。

8 结语

灵山岛地层褶皱、断层、滑塌体众多, 前人研究发现附近五莲—烟台断裂此时正是最强活动期, 说明区域构造活动频繁。灵山岛沉积物软变形种类丰富多样, 在区域上广泛出现, 纵向频率大, 侧向连续发育, 完全具有地震引发的标志特征, 所以判断灵山岛地区的沉积物软变形由地震触发引起。形成沉积物软变形构造的动力学主要为重力、反密度梯度、液化流动、横向剪切力等。断裂不断延伸下切, 不断诱发地震, 后期地震明显增强, 先是引起了大型滑塌构造, 深切至岩浆囊后, 最终引起强烈火山喷发, 形成了顶部厚火山凝灰岩。

致谢: 感谢乔秀夫教授对本文的悉心指导, 感谢李思田教授、陈景山教授、吕洪波教授在灵山岛的现场指导与交流。

参考文献:

- [1] 吕洪波, 王俊, 张海春. 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[J]. 地质学报, 2011, 85(6): 938-946.
- [2] 张建新, 杨天南, 许志琴, 等. 胶南地区的伸展作用——以胶南—诸城一带为例[J]. 地球学报, 1997, 18(2): 122-127.
- [3] 殷秀兰, 杨天南. 胶州—莱阳盆地白垩纪莱阳群中的震积岩及构造意义讨论[J]. 地质论评, 2005, 51(5): 502-507.
- [4] 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.
- [5] Moretti M, Soria J M, Alfaro P, et al. Asymmetrical soft-sediment deformation structures triggered by rapid sedimentation in turbiditic deposits (Late Miocene, Guadix Basin, Southern Spain) [J]. *Facies*, 2001, 44: 283-294.
- [6] 栾光忠, 李安龙, 王建, 等. 青岛主要海岛成因分类及其地质环境分析[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010, 40(8): 111-116.
- [7] 山东省第四地质矿产勘查院. 山东省区域地质[M]. 济南: 山东省地图出版社, 2003: 1-970.
- [8] 梁定益, 聂泽同, 宋志敏. 再论震积岩及震积不整合——以少西、滇西地区为例[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1994, 19(6): 845-851.
- [9] 乔秀夫, 李海兵, 王思恩, 等. 新疆境内塔拉斯—费尔干纳断裂早侏罗世走滑的古地震证据[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 721-730.
- [10] 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.
- [11] Van Loon A J. Soft-sediment deformation structures in siliciclastic sediments: an overview[J]. *Geologos*, 2009, 15: 3-55.
- [12] Moretti M, Ronchi A. Liquefaction features interpreted as seismites in the Pleistocene fluvio-lacustrine deposits of the Neuquén Basin (Northern Patagonia) [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235: 200-209.
- [13] Owen G. Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples[J]. *Sedimentology*, 1996, 43: 279-293.
- [14] Owen G. Load structures: gravity-driven sediment mobilization in the shallow subsurface[C]// Van Rensbergen P, Hillis R R, Maltman A J, et al. *Subsurface Sediment Mobilization*. London: London Geological Society, Special Publications, 2003, 216: 21-34.
- [15] Suter F, Martínez J I, Véllez M I. Holocene soft-sediment deformation of the Santa Fé-Sopetrán Basin, northern Colombian Andes: evidence for prehispanic seismic activity [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235: 188-199.
- [16] Kelling G, Walton E K. Load-cast structures: Their relationship to upper-surface structures and their mode of formation[J]. *Geological Magazine*, 1957, 44: 481-491.
- [17] Oliveria C M M, Hodgson D M, Flint S S. Distribution of soft-sediment deformation structures in clinoform successions of the Permian Ecca Group, Karoo Basin, South Africa [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235: 314-330.
- [18] Vanneste K, Meghraoui M, Camelbeeck T. Late Quaternary earthquake-related soft-sediment deformation along the Belgian portion of the Feldbiss Fault, Lower Rhine Graben System [J]. *Tectonophysics*, 1999, 309: 57-79.

- [19] 乔秀夫,郭宪璞. 新疆西南天山下侏罗统沉积物软变形研究[J]. 地质论评, 2011, 57(6): 761-769.
- [20] Owen G. Deformation processes in unconsolidated sands [C]// Jones M E, Preston R M F. Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks. London: London Geological Society, Special Publication, 1987, 29: 11-24.
- [21] Moretti M, Pieri P, Tropeano M. Late Pleistocene soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in paralic deposits in the city of Bari (Apulian forland, Southern Italy)[C]// Ettensohn F R, Rast N, Brett C E. Ancient Seismites; Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper, 2002, 359: 75-85.
- [22] Kuenen P H. Experiments in Geology Transactions of the Geological Society of Glasgow[J]. 1958, 23: 1-28.
- [23] Nichols R J, Sparks R S J, Wilson C J N. Experimental studies of the fluidization of layered sediments and the formation of fluid escape structures [J]. Sedimentology, 1994, 41: 233-253.
- [24] 周瑶琪,赵振宇,马晓鸣,等. 水下收缩裂隙沉积模式及量化研究[J]. 沉积学报, 2006, 24(5): 672-679.
- [25] 王安东,周瑶琪,仲岩磊,等. 陕南奥陶系宝塔组灰岩网状裂缝成因[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2012, 37(4): 843-850.
- [26] 王安东,周瑶琪,张振凯,等. 山东灵山岛莱阳群水下非构造裂缝特征及意义[J]. 地球学报, 2014, 35(3): 321-328.
- [27] Tanner P W G. Interstratal dewatering origin for polygonal patterns of sand-filled cracks: a case study from late Proterozoic metasediments of Islay, Scotland[J]. Sedimentology, 1998, 45(1): 71-89.
- [28] Sims J D. Determining earthquakes recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments Tectonophysics[J]. Sedimentology, 1975, 29: 141-152.
- [29] Obermeier S F. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis—a review of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes[J]. Engineering Geology, 1996, 44: 1-76.
- [30] 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.
- [31] Ettensohn F R, Rast N, Brett C E. Ancient Seismites [M]. Geological Society of America, Special Paper, 2002: 1-359.
- [32] Mazumder R, Van Loon A J, Arima M. Soft sediment deformation structures in the Earth's oldest seismites[J]. Sedimentary Geology, 2006, 186: 19-26.
- [33] Montenat C, Barrier P, Ott d'Estevou P, et al. Seismites: An attempt at critical analysis and classification [J]. Sedimentary Geology, 2007, 196: 5-30.
- [34] Moretti M, Sabato L. Recognition of triggering mechanisms for soft-sediment deformation in the Pleistocene lacustrine deposits of the Sant Arcangelo Basin (Southern Italy): Seismic shock vs overloading[J]. Sedimentary Geology, 2007, 196: 31-45.
- [35] Berra F, Felletti F. Syndepositional tectonics recorded by soft-sediment deformation and liquefaction structures continental Lower Permian sediments, Southern Alps, Northern Italy): stratigraphic significance[J]. Sedimentary Geology, 2011, 235: 249-263.
- [36] 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.
- [37] Owen G, Moretti M, Alfaro P. Recognising triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions[J]. Sedimentary Geology, 2011, 235: 133-140.
- [38] 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.
- [39] 乔秀夫,郭宪璞,李海兵,等. 龙门山晚三叠世软沉积物变形与印支期构造运动[J]. 2012, 86(1): 132-156.

SOFT-SEDIMENT DEFORMATION STRUCTURES IN THE SEDIMENTS AT LINGSHAN ISLAND

ZHOU Yaoqi^{1,2}, ZHANG Zhenkai^{1,2}, XU Hong^{3,4}, WANG Andong^{1,2},
WEI Kai^{1,2,3,4}, ZHANG Yuncui^{1,2}, WANG Ziyang^{1,2}, LI Dou^{1,2},
CHEN Yangzi^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, YU Shanshan^{1,2}, GAO Xiaojun^{3,4}

(1 School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2 Laboratory of Geochemistry & Lithosphere Dynamics, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

3 Key Laboratory of Marine Resources & Environmental Geology, MLR, Qingdao 266071, China;

4 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Many types of soft-sediment deformation structures, such as curled bedding, liquefied diapir, load structure, diapired structure, liquefied breccia, ball-pillow structure, water escape structure, micro-faults and large slump body, are found in the Cretaceous sediments at the Lingshan Island. Based on field observation and laboratory analysis, we described the characteristics and distribution pattern of the soft-sediment deformation structures, and discussed the paleo-morphology, driving forces and the deformation mechanism. The study area was suffered from frequent tectonic activities in early Cretaceous influenced by the nearby Wulian-Yantai fault. The deformation structures are most probably caused by earthquakes. The horizontal shear stress analysis for asymmetric load structures and micro-faults are used to determine the existence of paleo-slope and its direction. Our results verified the dominant paleo-slope dipping from SE to NW inferred by Lv Hongbo. Earthquakes induced volcanic eruptions and formed the thick white tuffaceous deposits. The deep fault, which may have extended to the magmatic pocket, provided channels for volcanic eruption.

Key words: Lingshan Island; Early Cretaceous; sediment soft deformation; liquefaction; earthquake