

灵山岛下白垩统软沉积物变形构造类型划分及其地质意义

孙福宁^{1,2}, 杨仁超², 樊爱萍², 尤靖茜³

1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023
2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590
3. 中国石油长庆油田分公司数字化与信息管理部, 西安 710021

摘要 软沉积物变形构造是沉积物沉积之后、固结成岩之前尚处于塑性状态时, 在液化作用和各种驱动力作用下发生不同程度变形的一系列构造。灵山岛下白垩统发育有多尺度、多形态、多层位、多期次、多成因的软沉积物变形构造, 为了研究其具体类型和成因机理, 以形态特征为基础, 以驱动力为分类依据, 将灵山岛下白垩统软沉积物变形构造划分为斜坡上的重力驱动、密度倒置条件下的重力驱动和孔隙流体作用下的剪切力驱动等三种类型。此外, 结合灵山岛下白垩统滑塌体内部的软沉积物变形构造分布特征, 根据斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造形成时所遭受的应力类型, 将其进一步分为挤压型、拉伸型和剪切型等三个亚类。在分析研究灵山岛软沉积物变形构造的基本类型、发育情况和分布特征等基础上, 认为灵山岛早白垩世地震活动非常频繁。驱动力直接作用于软沉积物, 驱动力的种类、大小、作用方式和持续时间是影响软沉积物变形构造类型、形态和规模的重要因素, 因此, 从驱动力角度对其进行系统划分具有科学性、适用性和可行性。探讨软沉积物变形构造的分类方案对其野外识别和成因分析具有科学价值。

关键词 软沉积物变形构造; 灵山岛; 下白垩统; 驱动力; 分类方案

第一作者简介 孙福宁, 男, 1994 年出生, 硕士研究生, 沉积学和石油地质学, E-mail: 1197119859@qq.com

通信作者 杨仁超, 男, 副教授, E-mail: yang100808@126.com

中图分类号 P512.2 P588.2 **文献标志码** A

0 引言

软沉积物变形构造作为一种特殊的沉积构造类型引起了国内外学者的广泛关注, 并就其形态特征^[1-2]、成因机制^[3-5]、分类方案^[1,6-7]等方面展开了深入研究。地震固然是引起软沉积物发生变形的一种重要因素^[4-16]、但风暴^[17-18]、海啸^[19-21]、滑塌^[22-26]、火山活动^[27]、冰冻或冰融^[28-30]、沉积物快速堆积^[31]、地外天体撞击^[32]等也是不容忽视的成因^[7-8,11,33-35]。由于不同事件可诱发相同的变形类型, 故按照诱发事件的分类方案在同种事件中较为适用, 而在具有“多成因、同现象”的变形中, 难以区分其真正的成因, 故基于触发机制的分类常具有较大的局限性。

Owen *et al.*^[36]指出软沉积物变形构造的形成必须同时满足三个条件: 驱动力改变沉积物的原始沉积特征; 变形机制使得沉积物处于可变形状态; 触发机制引发大多数变形机制的发生。驱动力直接作用于软沉积物, 驱动力的种类、大小、作用方式和持续时间是影响软沉积物变形构造类型、形态和规模的重要因素, 驱动力的研究对软沉积物变形构造的野外识别、形成环境和成因机理的分析判定等具有重要意义。因此, 本文结合灵山岛下白垩统软沉积物变形构造发育情况, 探讨了基于驱动力的软沉积物变形构造分类方案, 以为相关领域的研究提供参考。

1 软沉积物变形构造研究背景和现状

软沉积物变形构造 (soft-sediment deformation structures) 是沉积物沉积之后、固结成岩之前尚处于塑性状态时, 在液化作用和各种驱动力作用下发生不同程度变形的一系列构造。触发软沉积物发生变形的事件有很多, 例如地震、风暴、海啸、重力滑塌、流体作用、火山活动、沉积物快速堆积等都可以引起未固结沉积物发生液化和变形, 并在成岩和后生作用过程中得以保存, 形成地层中常见的软沉积物变形构造。地震是引起软沉积物发生变形的最常见的一种触发机制。早在 19 世纪中叶, 就有对软沉积物变形构造研究的相关记载^[37]。1969 年, Seilacher^[38]将未固结的软沉积物被地震改造之后的再沉积层定义为地震岩 (seismites), 开启了软沉积物变形构造研究的新篇章。此后, 国内外学者对软沉积物变形构造的研究逐渐成为地质学科的热点领域之一, 并在形态特征、成因机制、种类划分、实验模拟等方面做了大量工作, 并取得了很多重要成果^[1-37,39-46]。近年来, 国内外

收稿日期: 2017-07-19; 收修稿日期: 2017-11-29

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (2017CXGC1608); 国家自然科学基金项目 (41372135、41672120); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (201510424008)

[Foundation: Key Research and Development Program of Shandong Province, China, No. 2017CXGC1608; National Natural Science Foundation of China, No.41372135, 41672120; National Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship of China, No.201510424008]

学者越来越注重软沉积物变形构造的多成因性，阐述了“seismites”和“soft-sediment deformation structures”之间的联系和区别^[4,16,34-35,44-45]。2016年9月24日，第14届全国古地理学及沉积学学术会议召开了“多成因的软沉积物变形构造及地震岩”专题研讨会，对软沉积物变形构造、地震岩、震积岩等问题进行了讨论和争鸣^[45]。不可否认的是，国内外学者对软沉积物变形构造的地震解释有一种扩大的趋势^[34,45]。地震岩中的变形构造不全是软沉积物变形构造，软沉积物变形构造也并非全部由地震形成的。

地层中往往发育有不同尺度、不同形态、不同期次、不同成因的软沉积物变形构造，对其系统描述和分类无疑是国内外学者研究的热点和难点。现有的分类主要是依据软沉积物变形构造的形态特征、形成机理或成因，或结合形态和成因对其进行综合分类^[46]，而对直接作用于软沉积物的驱动力的关注较少。引起软沉积物发生变形的最直接因素是各种驱动力，因此，从驱动力角度对其进行系统划分具有科学性、适用性和可行性。

2 地质概况

灵山岛位于山东省青岛经济技术开发区黄海近海海域，距离最近的陆地大珠山约9.8 km，距离积米崖港约16.7 km，岛型狭长，南宽北窄，面积约7.66 km²，岛内最高峰歪头顶海拔513.6 m（图1）。栾光忠等^[47]将其成岛类型归为构造掀斜型。从大地构造位置上看，灵山岛位于灵山岛凹陷内，西北方向因胶南隆起与胶莱盆地相隔，东南方向为千里岩隆起，正好处于苏鲁造山带的中部地带，受扬子板块与华北板块碰撞控制，多条区域性断层也呈NE—SW向平行展布，大地构造位置十分关键（图1a）。

山东省第四地质矿产勘察院^[48]和栾光忠等^[47]认为灵山岛出露两套地层：上部的青山群（K₁q）八亩地组火山岩不整合于下部的莱阳群（K₁l）法家莹组沉积岩之上（图1b），是胶莱盆地陆相沉积在盆地边缘的露头。吕洪波等^[22,49]认为下部的沉积岩实为一套海相复理石沉积，张海春等^[50]为此建立了一新的岩石地层单位——灵山岛组，是与胶莱盆地中广泛分布的下白垩统莱阳群法家莹组同期异相的地层。对灵山岛老虎嘴处流纹岩进行LA-ICP-MS测年，获得锆石U-Pb年龄为119.2±2.2 Ma，地质时代为早白垩世^[51]。流纹岩之下的沉积层是本文研究的层位，其中发育有多种类型的软沉积物变形构造。

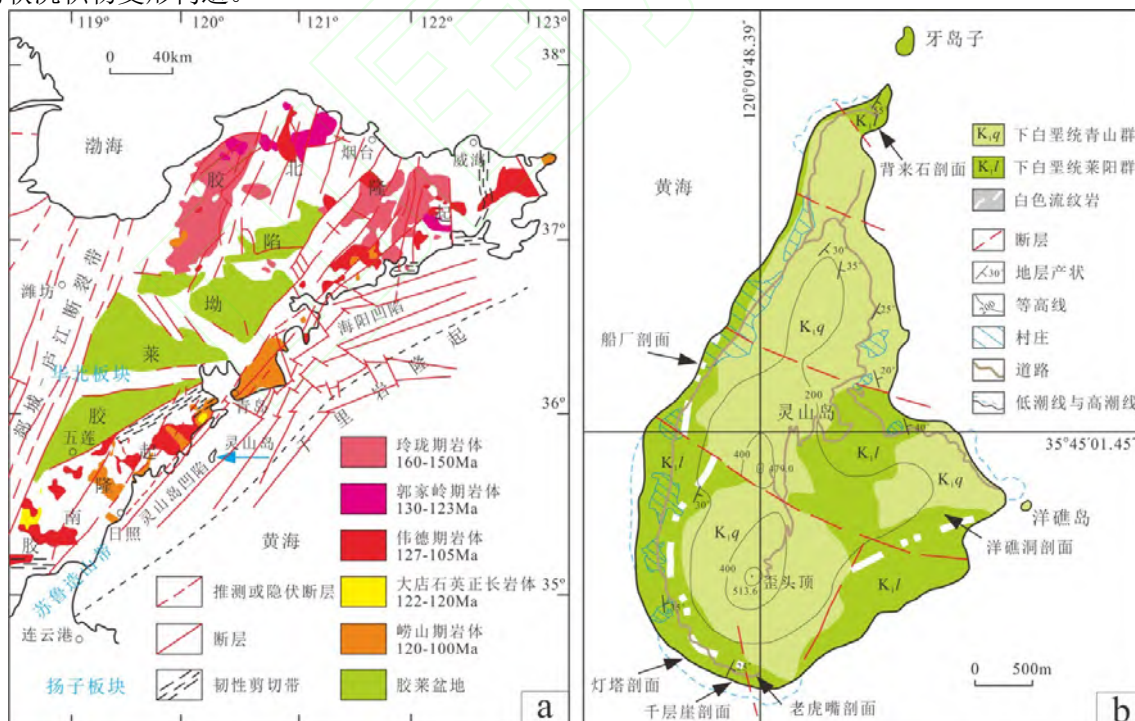


图1 灵山岛区域地质 (a.据文献[51]修改)与地质简图 (b.据文献[47]修改和 Google Earth)

Fig.1 Location and simplified geologic map of Lingshan Island (a. modified from reference [51]; b. modified from reference [47] and Google Earth)

3 驱动力分类原则和分类方案

Owen *et al.*^[36]认为引起软沉积物发生变形的驱动力主要包括五种类型：1)斜坡上的重力；2)不规则地形引起的不均匀负载；3)密度倒置引起的重力不稳定；4)水或其他流体产生的剪切力；5)生物和化学因素。在相关文献调研基础上，结合灵山岛下白垩统软沉积物变形构造野外观察资料，并参考前人的分类方案，借鉴其中的部分方法与思路，本文提出了一个基于驱动力的软沉积物变形构造分类方案（表 1）。分类的基本原则是：1)以形态特征为基础，以驱动力为分类依据；2)多种驱动力共同作用时，取最主要的、最能反映其形态特征的驱动力作为分类依据；3)当有应力作用时，首先根据驱动力划分至大类，再根据应力类型划分至亚类；4)考虑形态特征，对由相似作用力而具有不同形态的类型予以区分，以便于在野外进行准确识别；5)尽量沿用现有且最流行的沉积学术语，并对同种现象、不同说法的变形类型进行系统总结；6)在科学与系统分类基础上，避免繁琐，能简不繁。

根据以上原则，将灵山岛下白垩统软沉积物变形构造划分为斜坡上的重力驱动、密度倒置条件下的重力驱动、孔隙流体作用下的剪切力驱动等三种类型。此外，灵山岛下白垩统发育有多套重力滑塌体，其内部软沉积物变形构造复杂多样。滑塌体及其相关的软沉积物变形构造形成于斜坡环境，整体受重力驱动，但滑塌体内部的在滑塌过程中形成的软沉积物变形构造的类型、形态等受重力影响有限。在综合分析滑塌体内部软沉积物变形构造发育情况和分布特征等基础上，认为在滑塌过程中形成的软沉积物变形构造与沉积物在滑塌过程中所遭受的应力状态有着直接关系，故根据其形成时所遭受的应力类型，将斜坡上重力驱动的（滑塌引起的）软沉积物变形构造进一步分为挤压型、拉伸型和剪切型等三个亚类。

表 1 灵山岛下白垩统基于驱动力的软沉积物变形构造分类方案

Table 1 Classification of soft-sediment deformation structures based on driving forces of lower Cretaceous in Lingshan Island

软沉积物变形构造类型		软沉积物变形构造基本种类		分布位置	变形时间
滑塌引起的变形	斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造	挤压型	同生逆断层、混杂的挤压变形（揉皱变形、砂质团块等）	滑塌体内部	滑塌过程中
		拉伸型	同沉积布丁构造、阶梯状断层、多米诺骨牌构造		
		剪切型	软双重构造、剪切力作用的褶皱和断裂		
地震引起的变形	密度倒置条件下重力驱动的软沉积物变形构造	负载构造、火焰构造、球—枕构造		滑塌体内部或正常沉积层	滑塌前或滑塌后
	孔隙流体作用下剪切力驱动的软沉积物变形构造	底劈构造、泄水构造、包卷层理、砂岩脉			

4 基本类型和特征

灵山岛下白垩统沉积岩中发育有多尺度、多形态、多层位、多期次、多成因的软沉积物变形构造，本文在详细的野外考察和室内研究基础上，共识别和划分出斜坡上的重力驱动、密度倒置条件下的重力驱动和孔隙流体作用下的剪切力驱动等三大类 10 余种软沉积物变形构造，现将其主要类型介绍如下：

4.1 斜坡上的重力驱动

斜坡环境的沉积物在某种触发机制的作用下发生滑塌，产生一系列的软沉积物变形构造^[25,52-53]。沉积物沿斜坡向下滑动过程中整体受重力驱动，与滑塌相关的软沉积物变形构造（褶皱、断层等）也均受重力驱动，并且被认为能够很好地体现古斜坡的方位^[52]。重力作为该类软沉积物变形构造的驱动力，对整个滑塌体及其滑塌引起的软沉积物变形构造具有控制作用，但对其具体类型和形态等影响有限。影响斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造的最直接因素是沉积物在滑塌过程中所遭受的各种应力。

滑塌体内部在滑塌过程中应力条件非常复杂，并在各种应力作用下形成了多种类型的软沉积物变形构造。其中，船厂剖面滑塌体及其内部的软沉积物变形构造最为发育，既包括滑塌过程中形成的软沉积物变形构造，也包括滑塌前形成的软沉积物变形构造，前者即为斜坡上重力驱动的软沉积

物变形构造,后者包括密度倒置条件下重力驱动的软沉积物变形构造和孔隙流体作用下剪切力驱动的软沉积物变形构造。根据滑塌体内部因滑塌引起的软沉积物变形构造形成时所遭受的应力类型,将斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造进一步分为挤压型、拉伸型和剪切型等三个亚类。

4.1.1 挤压型

(1) 同生逆断层

断层不限于固结岩层中,在饱和水的、未固结沉积物中也可发育^[54]。在滑塌体中,当沉积物沿斜坡下滑过程中,随着坡度减缓,滑塌体前缘的沉积物遭受挤压可形成同生逆断层。图 2a 中的同生逆断层位于船厂剖面的滑塌体前缘,断层面不明显,倾角约 20° 左右,平缓弯曲,切穿互层的薄层砂岩、泥岩。断层面两侧沉积物牵引弯曲,形成牵引小褶曲。薄层砂岩破碎较为严重,砂质团块多呈椭球形叠置状分布;薄层泥岩连续性良好。该同生逆断层显然是沉积物沿斜坡向前滑动过程中受阻挤压形成的。

(2) 混杂的挤压变形

滑塌体前缘以挤压应力为主,软沉积物在挤压应力作用下,原始沉积物特征遭受破坏,表现为混杂变形的特征。图 2b 中所示的混杂的挤压变形位于船厂剖面滑塌体前缘,沉积物沿斜坡向前滑动过程中遭受挤压应力,泥质沉积物弯曲形成揉皱变形,纹层较为连续;砂质沉积物发生挤压形成砂质团块和弯曲变形。其中,揉皱变形表现为极不协调状;砂质团块以球形、椭球形为主,被泥质沉积物包围。

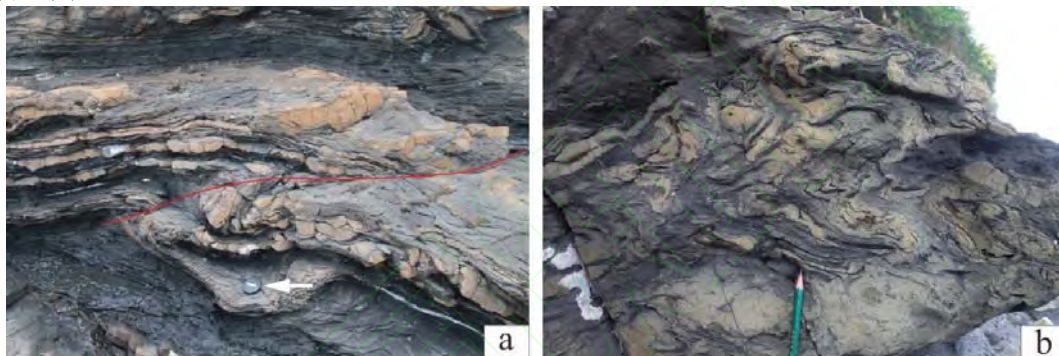


图 2 斜坡上重力驱动的挤压型软沉积物变形构造

a.同生逆断层,镜头盖:7 cm; b.混杂的挤压变形,包括揉皱变形、砂质团块等,铅笔:8 cm

Fig.2 Soft-sediment deformation structures of compression types driven by gravity acting on slopes

4.1.2 拉伸型

(1) 同沉积布丁构造

吕洪波等^[22]最早将沉积岩中的布丁构造命名为同沉积布丁构造,常见于砂泥交互的薄层砂岩层中^[22,53,55-56]。灵山岛船厂剖面滑塌体中的同沉积布丁构造最为典型。布丁构造主要发育在滑塌体近底部的薄层砂岩中,在 10~20 cm 的中层砂岩中也偶有发育。砂岩层在顺层拉伸力作用下表现为局部厚度减薄(图 3a),进而发育成布丁块体,布丁块体间为较薄的喉颈状砂岩,连接处可见牵引的痕迹,表明为沉积物部分液化后的塑性变形(图 3b);塑性的砂岩层进一步在拉伸力作用下,布丁块体完全分隔成纺锤形的砂质团块,被泥质沉积物完全包围,一般呈群体出现(图 3c)。此处的布丁构造是在滑塌体向前滑动过程中砂岩层遭受拉伸所致,叠置状的布丁块体同时受到一定的剪切力作用。布丁块体倾倒方向指示滑塌下坡方向,即块体间同生微型正断层的倾向指示滑塌源头。图 3b 中的布丁块体间的微断层倾向 SE,表明沉积物由 SE 向 NW 方向滑塌。布丁块体指示滑塌方向具有一定的局限性,滑塌方向只能代表所在层位的局部滑塌方向。

(2) 阶梯状断层和多米诺骨牌构造

阶梯状断层^[57-58],又称作粒序断层^[13]或韵律断层^[43],是限于层内发育的一组断距很小的小型或微型正断层^[13,56,59]。阶梯状断层的断层面倾角往往较大,且呈阶梯状排列。图 3d 中的阶梯状断层位于船厂剖面滑塌体内的浊积岩中,尺度很小,断距约 1 cm 左右,断层面倾角约 40° 左右,切穿部分砂泥纹层,且限于岩层内部发育。沉积物快速堆积,颗粒间含有大量的水和空隙,在滑塌过程中脱水收缩、差异下沉遭受拉伸所致。图 3e 中的阶梯状断层与多米诺骨牌构造相伴生,砂岩层被完全拉断,表现为一系列菱柱状的呈叠瓦状排列的块体,中间被同生微型正断层隔开,近于平行的多条正断层呈阶梯状排列,倾角约 45° 左右。多米诺骨牌构造可以与同沉积布丁构造相伴生,但前者表现为一定的脆性变形,是较强硬砂层在受到强烈的顺层拉伸作用下形成的。

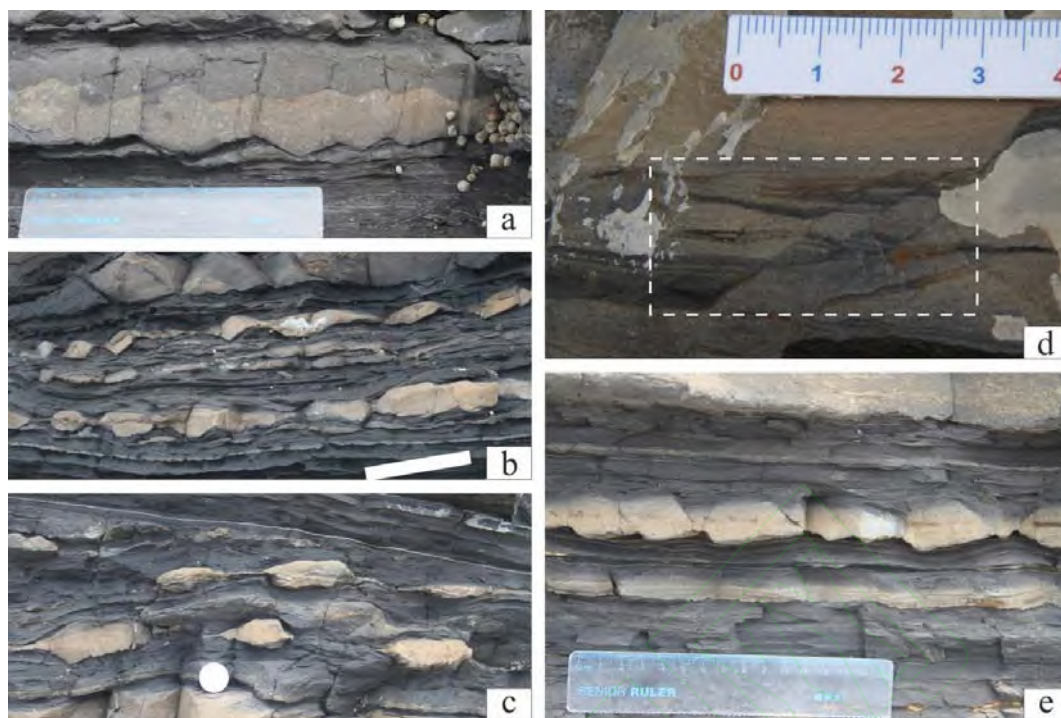


图3 斜坡上重力驱动的拉伸型软沉积物变形构造

a.厚度局部减薄的砂岩层,直尺:15 cm; b.同沉积布丁构造,布丁块间以较薄的喉颈状砂岩连接,直尺:10 cm; c.布丁块体完全分隔成纺锤形的砂质团块,硬币:22.5 mm; d.阶梯状断层,直尺:4 cm; e.阶梯状断层和多米诺骨牌构造,直尺:15 cm

Fig.3 Soft-sediment deformation structures of tension types driven by gravity acting on slopes

4.1.3 剪切型

(1) 软双重构造

软双重构造^[60],又称作同沉积双重构造^[22,53]或滑叠构造,是由一系列S形、Z形或板片状砂泥岩相互叠置所形成的软沉积物变形构造^[55]。逆冲块体呈叠瓦状排列,但与构造运动无关,属于沉积成因,一般认为是在水下滑塌体中遭受牵引剪切形成的^[7,52]。图4a中所示的软双重构造位于船厂剖面滑塌体内部,砂岩块体以反S形呈叠瓦状排列,厚不足15 cm,上下均为连续的层状泥岩。软双重构造的叠置关系可以反映局部的滑塌方向,该处表明滑塌由SE向NW方向。

(2) 剪切力作用的褶皱和断裂

滑塌体内部在剪切力作用下形成的褶皱和断裂现象非常常见。沉积层沿斜坡向下滑动过程中,当相邻层具有不同的滑动速度时,沉积物就会遭受剪切力作用,当剪切力大于沉积层的屈服强度时就会发生断裂或褶皱变形。由于沉积物尚未完全固结,变形中可见塑性牵引的痕迹。图4b位于船厂剖面的滑塌体内部,极薄层的砂泥层在剪切应力作用下形成若干相互叠置的平卧褶皱,局部纹层被剪切错断。滑塌体内部发育有大量的次级褶皱,多为水平褶皱和斜歪褶皱,形态多样,尺度不一,多是沉积物在滑塌过程中受到局部剪切应力作用下形成的。

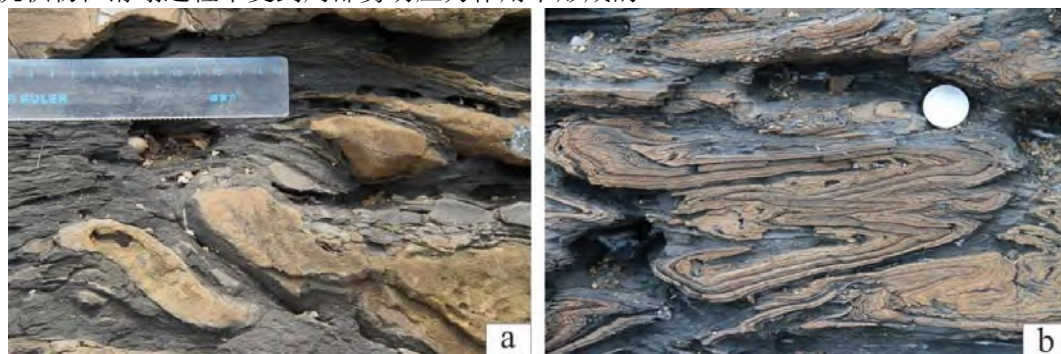


图4 斜坡上重力驱动的剪切型软沉积物变形构造

a.软双重构造,直尺:13 cm; b.剪切褶皱与剪切断裂,硬币:22.5 mm

Fig.4 Soft-sediment deformation structures of shear types driven by gravity acting on slopes

4.2 密度倒置条件下的重力驱动

所谓密度倒置条件下重力驱动的软沉积物变形构造，就是以沉积物密度倒置为前提条件[4-5,15,31,39,61-62]，即密度大的粗粒沉积物在上，密度小的细粒沉积物在下（例如，砂级沉积物在上，粉砂级沉积物在下；砂质沉积物在上，泥质沉积物在下），由于强烈震动，未固结的、饱和水的砂质沉积物会发生不同程度的液化作用（*liquefaction*）^[13,32,39,61-62]，使得沉积物孔隙流体压力增加，颗粒重量被转移到孔隙流体压力之上，导致沉积物强度变低，上覆沉积物因重力作用而下沉、变形，主要是发生垂向上的运动。该类软沉积物变形构造在灵山岛下白垩统分布十分广泛，主要包括负载构造、火焰构造和球—枕构造等。

4.2.1 负载构造和火焰构造

上下密度倒置的软沉积物在液化后强度降低，上覆密度大的沉积物在重力驱动下发生下沉形成负载构造，下伏密度小的沉积物向上挤入形成火焰构造^[11,15,20,31,39,61-63]，负载构造和火焰构造通常伴生在一起，其中，砂质下沉形成的负载构造和泥质向上挤入形成的火焰构造最为常见。负载构造和火焰构造在灵山岛多个剖面中的多个层位均有发育，一般规模较小，多为中—细砂下沉、泥质沉积物向上挤入形成的。同一层位的负载构造和火焰状构造形态相似，规模相近，侧向连续性较好，在层内连续分布；不同层位的负载构造和火焰状构造形态、规模可相差较大（图 5a, b）。

4.2.2 球—枕构造

负载体进一步下沉，形成具有同心纹层的球状体或枕状体，即球—枕构造^[9,13,32,39,62,64]。Morreti *et al.*^[9]通过野外测量和统计，认为球—枕构造的形状与负载体的沉降深度有关，即深度越大，形状更扁。球—枕构造一般不会单独出现，而是平行于层面成组、成群出现。图 5c, d 所示的球—枕构造规模均较小，沿长轴方向顺层展布，且大致下降到同一深度，是中砂下沉到细砂中形成的，分别位于滑塌褶皱的上翼和下翼，均是在滑塌前就已经形成，滑塌只是改变了其产状，但并未对其形成过程和具体形态产生较大影响。图 5c 所示的球—枕构造近于对称状，多呈圆球形，上覆母岩层底部可见砂质负载体。图 5d 所示的球—枕构造呈不对称状，边部可见牵引拉长的痕迹，多呈椭球形。

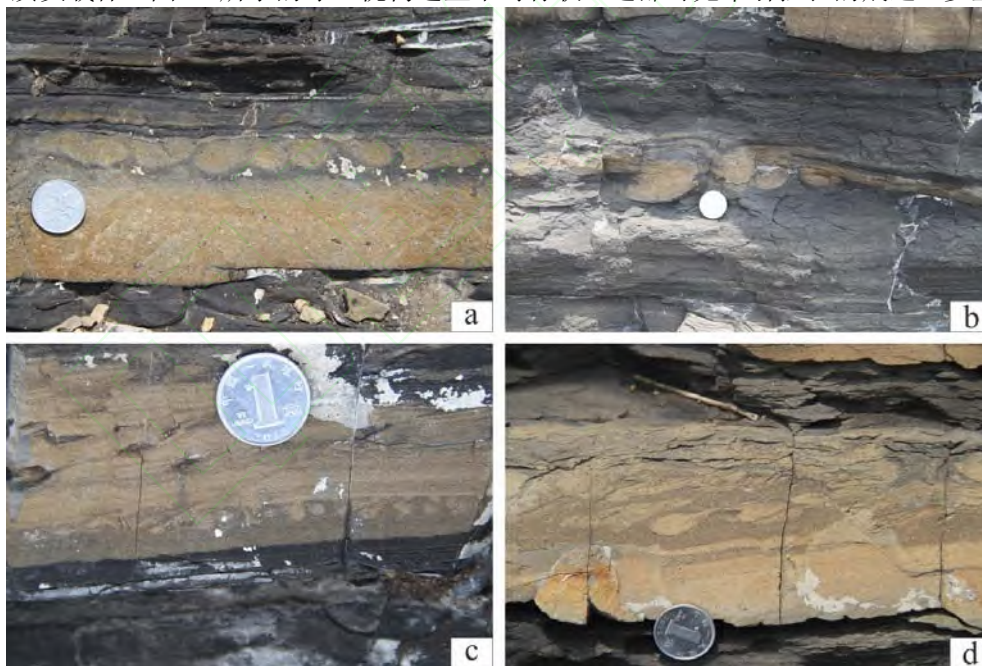


图 5 密度倒置条件下重力驱动的软沉积物变形构造

a. 负载构造和火焰构造，火焰状的泥质向上挤入并刺穿上覆砂岩层，硬币：22.5 mm；b. 负载构造和火焰构造，负载体渐与母岩层分隔，硬币：22.5 mm；c. 球—枕构造，中砂下沉至细砂沉积物中所致，位于滑塌褶皱上翼，图片旋转了 180°，硬币：22.5 mm；d. 不对称球—枕构造，中砂下沉至细砂中所致，位于滑塌褶皱下翼，硬币：22.5 mm

Fig.5 Soft-sediment deformation structures of driven by gravity due to a reverse density gradient

4.3 孔隙流体作用下的剪切力驱动

孔隙流体流经粒间孔隙时产生向上的剪切力可以抵消颗粒的重量，使沉积物暂时处于弱化状态，该过程沉积物发生流体化作用（*fluidization*）^[7,36,39,65]。流体化作用使沉积物处于可流动状态，

形成的软沉积物变形构造一般具有一定的方向性，是沉积物流动的反映。该类型的软沉积物变形构造主要发生在泥质岩层所夹的砂质岩层中^[14]，其驱动力是沉积物孔隙流体作用下的剪切力。

4.3.1 底劈构造

下部砂质沉积物在强烈震动下发生流体化作用，沉积物向上流动并弯曲变形；上覆具有触变特性的泥质沉积物只是受到下部砂质层的压力而向上穹凸，而未被穿透，这种构造称为底劈构造^[12-13,66]，一般呈锥形、蘑菇形、柱形、穹形、三角形等形态^[13]。灯塔剖面多个底劈构造沿同一层位成组出现。图 6a 所示的底劈构造呈三角形，规模不大，长 40 cm 左右，最大高度约 22 cm 左右，下部为未变形的互层的薄层砂泥岩，中部为弯曲的薄层细砂岩构成的三角形，上部为穹凸的薄层泥岩。

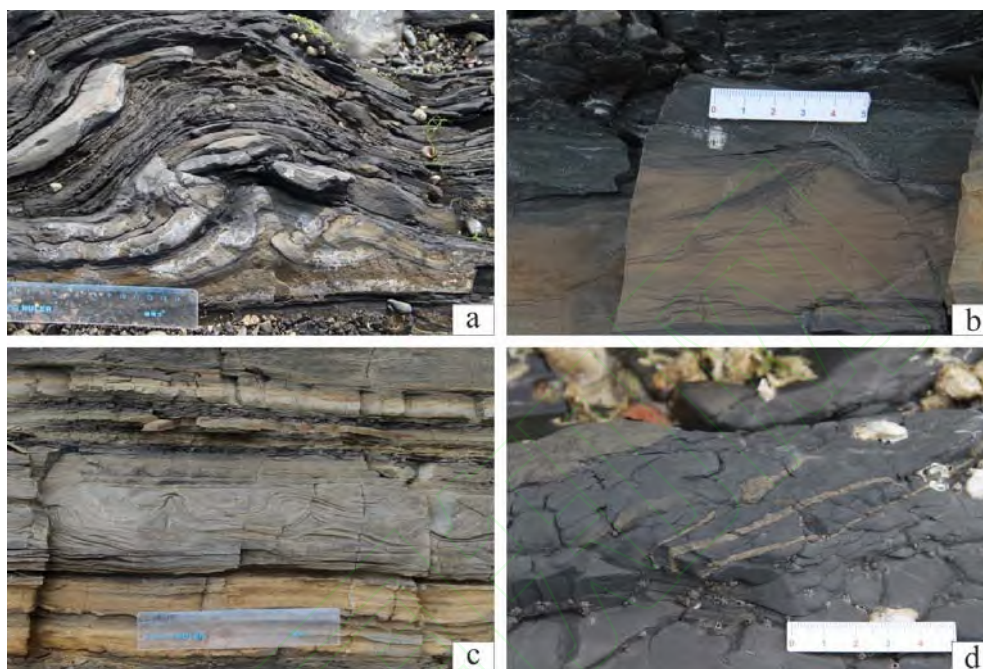


图 6 孔隙流体作用下剪切力驱动的软沉积物变形构造

a.底劈构造，直尺：13.5 cm；b.泄水构造（泄水嘴），直尺：5 cm（据文献[56]）；c.包卷层理，直尺：15 cm；d.砂岩脉，直尺：5 cm

Fig.6 Soft-sediment deformation structures driven by shear due to pore fluid

4.3.2 泄水构造

当沉积物中的孔隙水压力超过围岩承受力时^[15,55,67-68]，孔隙水向上泄出并引起颗粒的重新排列^[64,68]，形成泄水构造，多发生在富含水的砂质沉积物中。有时纹层受到向上排出水的牵引而弯曲变形，剖面上呈现向形，又被称作碟状构造^[12-13,36,40]。泄水构造可表现为火焰状、漏斗状和脉状等不同的形态。图 6b 所示的泄水构造发育在船厂剖面浊积岩内部，形成于滑塌之前，呈三角形，似火焰状，规模较小，最高处不足 3 cm。浊流携带的沉积物快速堆积，沉积物松散而富含水分，在震动下发生流体化作用，孔隙流体向上逃逸牵引砂质和泥质纹层向上弯曲，呈现向形。

4.3.3 包卷层理

包卷层理^[36,42,69-70]，也有人把它称作震褶层^[11,13,33,64,66]、微褶皱纹理^[42]或包卷褶皱^[71]等，是发生流体化作用的沉积物在层内流动产生的小褶皱或微褶皱。图 6c 所示的包卷层理位于码头南侧，变形层分布稳定，延伸较远，上下岩层均未变形，毫米级厚的砂质沉积物纹层弯曲成一系列规模相近的规则褶曲形态，纹层连续弯曲而未有错断。单个褶曲宽 8~12 cm，高 5 cm 左右，具紧闭的背斜和宽缓的向斜；多个褶曲间彼此相连，紧密发育，是沉积物发生流体化作用后，在孔隙水剪切力作用下卷曲变形而成。

4.3.4 砂岩脉

沉积物（通常为砂质、泥质或碳酸盐类）发生流体化作用之后常具有流动的特征，可充填先前形成的裂隙^[8,11,13]、注入或刺穿其他层位^[22,32,66]形成液化脉。根据成分，液化脉又可分为砂岩脉、泥岩脉和泥晶脉^[8,13,22,32,42]。图 6d 所示的砂岩脉发育在船厂剖面滑塌体下部的正常沉积层中，呈直带状，长可达数十厘米，宽不足 1 cm。砂岩脉形态受裂隙控制，表明形成时泥质沉积物已固结，并产生裂隙，是流体化的砂质沉积物后期沿该裂隙充填形成的。

5 地质意义

作为一种常见的沉积构造,软沉积物变形构造的研究是近年来沉积构造研究中最活跃和热门的内容之一^[69],也取得了很多重要进展,但引起软沉积物发生变形的因素是复杂多样的,对其形成机制和识别依据仍缺乏认识。软沉积物变形构造多为事件作用的产物,其发育状况能够很好地反映事件的发生时间、期次、类型和规模,系统归纳总结软沉积物变形构造的类型对恢复盆地充填史和构造演化史等具有重要意义。从驱动力角度对灵山岛下白垩统软沉积物变形构造类型进行划分,对深入研究其形态特征、组合特征、成因机理、沉积环境和构造背景等具有重要意义。

灵山岛下白垩统发育有多尺度、多形态、多层位、多期次、多成因的软沉积物变形构造。横向上,虽然灵山岛面积仅为 7.66 km²,沉积岩出露面积不足 1/2,但软沉积物变形构造分布十分广泛,且连续性较好;纵向上,在 80 余米的沉积层中共识别出三大类 10 余种软沉积物变形构造,各种变形类型反复出现,每个剖面也都具有其独特特征及占主导地位的变形类型。

前人研究认为灵山岛滑塌体和丰富的软沉积物变形构造的触发机制为地震^[22-24,49,53,56,66]。灵山岛下白垩统从滑塌、砂质碎屑流到浊流等重力流沉积反复出现,软沉积物变形构造种类非常丰富。五莲—烟台断裂活跃时间为早白垩世,与灵山岛直线距离不足 40 km,与两侧沉积盆地(灵山岛凹陷和胶莱盆地)中大量发育的软沉积物变形构造在时间和空间上均能够形成良好的匹配(图 1a)^[66,72]。种种迹象表明,灵山岛早白垩世地震活动非常频繁。

本文根据引起软沉积物发生变形的主要驱动力类型,将灵山岛下白垩统软沉积物变形构造划分为滑塌引起的变形和地震引起的变形两类,前者为斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造,后者包括密度倒置条件下重力驱动的软沉积物变形构造和孔隙流体作用下剪切力驱动的软沉积物变形构造。同种驱动力作用下的软沉积物变形构造的形态具有相似性或继承性。同一层位的软沉积物变形构造表现为相同的变形类型和相似的变形特征;同一类型的软沉积物变形构造在不同层位呈周期性反复出现,但形态可略有差异,规模可相差较大,其具体形态的差异反映了沉积物特性及驱动力大小、持续时间和作用方式的不同。灵山岛下白垩统基于驱动力的软沉积物变形构造分类能够将滑塌沉积层与正常沉积层中的软沉积物变形构造区分开来,能够将滑塌过程中形成的和地震过程中形成的软沉积物变形构造区分开来(表 1),明确了软沉积物变形构造形成的动力学机制,对进一步分析其形成机理具有重要意义。

6 讨论

6.1 与驱动力的关系

软沉积物变形构造可能是在多种驱动力^[36]和应力(挤压力、拉伸力和剪切力)共同作用下形成的,这也就造成了基于驱动力分类的复杂性,为避免繁琐,当多种驱动力共同作用时,取最主要的、最能反映其形态特征的驱动力作为分类依据;当应力作用于软沉积物时,首先根据驱动力类型划定到大类,其次再根据应力类型划分到亚类。例如,同沉积布丁构造整体受重力驱动,应力包括顺层的拉伸力和垂直于沉积层的挤压力,但以拉伸力为主,故将其归为斜坡上重力驱动的拉伸型软沉积物变形构造;负载构造、火焰构造和球—枕构造等受到横向剪切力作用时会发生旋转或表现为不对称状,形成向剪切力方向倾倒的形态,按照驱动力分类原则,可以将该类型划分为密度倒置条件下重力驱动的剪切型亚类,但避免繁琐,本文并没有将这类变形单独分出,但这类软沉积物变形构造在分析滑塌方向、古地形等发面发挥着尤为重要的作用^[31,39,63],在野外观察分析时需格外注意。

根据灵山岛下白垩统软沉积物变形构造的驱动力类型,将其划分为斜坡上的重力驱动、密度倒置条件下的重力驱动和孔隙流体作用下的剪切力驱动等三大类。三角洲前缘沉积物在自身重力驱动下沿水下斜坡发生滑塌,形成了滑塌体。滑塌体内部的在滑塌过程中形成的软沉积物变形构造受斜坡上的重力驱动;滑塌体内部的滑塌前形成的软沉积物变形构造和正常沉积层中的软沉积物变形构造受密度倒置条件下的重力驱动和孔隙流体作用下的剪切力驱动。驱动力是引起软沉积物发生变形的最直接因素,控制着软沉积物变形构造的具体类型和形态。

6.2 与触发机制的关系

地震是引起软沉积物发生变形的最常见的一种触发机制,许多学者对地震岩中的变形构造进行过详细的描述与分类^[4-16]。然而,软沉积物变形构造可以由多种事件触发,并不限定于地震这一种成因,而且其本身也不是任何特定触发机制的判别标准^[10,36]。目前的分类主要是依据成因机制,而不同类型的变形在不同成因事件中是有交错的,基于驱动力分类在一定程度上可以解决这一问题;此外,类似的软沉积物变形构造可以是不同事件作用下的产物,对其触发机制的识别是非常困难的

[7,32]。触发机制是引起软沉积物发生变形的先决条件,但非直接关系;驱动力和沉积物特性决定变形的类型和形态特征。不同驱动力作用下所产生的不同类型的软沉积物变形构造的组合和分布特征等有助于确定触发机制的类型及规模。

灵山岛下白垩统密度倒置条件下重力驱动的软沉积物变形构造和孔隙流体作用下剪切力驱动的软沉积物变形构造在滑塌体内部和正常沉积层均有分布,是在滑塌前或滑塌后形成的,横向上分布十分广泛,纵向上反复出现,结合研究区早白垩世构造环境,判断是由地震触发形成的。在强烈的震动下,沉积物发生液化(广义),孔隙流体压力增加,强度减低。而斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造仅限于滑塌体内部发育,是在滑塌过程中形成的,虽然当时的沉积和构造环境更倾向于地震的发生,但不能排除非地震触发的可能性,丰富的碎屑物质供给、快速堆积的重力流沉积环境为沉积物在沉积坡度控制下、在自身重力作用下发生滑塌提供了可能。

6.3 与变形机制的关系

在多数情况下,砂泥沉积物表现为黏性的流体或塑性的固体,砂质沉积物会发生不同程度的液化(广义)^[13,32,39,61-62],较弱的驱动力就可以促使其发生变形。广义的液化(liquidization)包括发生在无黏着力沉积物中的液化(liquefaction)、流体化(fluidization)和发生在黏着力沉积物中的触变(thixotropy)^[61]。对于未固结的富含孔隙水的沉积物而言,液化作用(liquefaction)和流体化作用(fluidization)是最常见和最重要的变形机制^[7,36,39,65]。原本颗粒支撑的沉积物在遭受强烈的震动下,颗粒发生位移和旋转^[60],改变其排列结构,并趋于密实^[7,39-40],使得孔隙流体压力大于或等于颗粒自重,原始沉积构造遭受破坏^[67]。沉积物可液化(广义)的粒径在0.02~1 mm之间,黏土一般不液化^[13,73]。

不可否认的是,软沉积物变形构造形成过程中沉积物发生了液化(广义),但液化的程度可能存在较大的差异。灵山岛下白垩统基于驱动力的统软沉积物变形构造分类方案能够较好的区分软沉积物变形时的液化程度和液化方式。斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造(滑塌引起的变形)形成时沉积物液化程度较低,主要表现为应力作用下的变形形态,该类型形成时沉积物尚未完全固结,因此属于软沉积物变形构造的范畴。密度倒置条件下重力驱动的和孔隙流体作用下剪切力驱动的软沉积物变形构造(地震引起的变形)形成时沉积物液化程度较高,前者主要以液化作用(liquefaction)为主,后者主要以流体化作用(fluidization)为主。

7 结论

(1) 软沉积物变形构造作为一种常见的沉积构造,对其进行系统分类和总结具有重要意义。本文以形态特征为基础,以驱动力为分类依据,提出了一个基于驱动力的软沉积物变形构造分类方案,将灵山岛下白垩统软沉积物变形构造划分为斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造、密度倒置条件下重力驱动的软沉积物变形构造和孔隙流体作用下剪切力驱动的软沉积物变形构造等三大类。此外,根据沉积物在滑塌过程中所遭受的应力类型,将斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造进一步划分为挤压型、拉伸型和剪切型等三个亚类。

(2) 灵山岛下白垩统发育的软沉积物变形构造具有多尺度、多形态、多层位、多期次、多成因的特点,分布十分广泛,横向上连续性好,纵向上反复出现,共识别和划分出三大类10余种软沉积物变形构造。其中,密度倒置条件下重力驱动的和孔隙流体作用下剪切力驱动的软沉积物变形构造能够明确指示地震成因,而斜坡上重力驱动的软沉积物变形构造与滑塌过程中的各种应力密切相关,很可能是由地震触发的,但不能排除非地震触发的可能。灵山岛丰富的重力流沉积和类型多样的软沉积物变形构造表明该地区早白垩世地震活动非常频繁。

(3) 灵山岛下白垩统基于驱动力的软沉积物变形构造分类方案能够将滑塌沉积层与正常沉积层中的软沉积物变形构造区分开来,能够将滑塌过程中形成的与地震过程中形成的软沉积物变形构造区分开来,明确了软沉积物变形构造形成的动力学机制,因此,从驱动力角度对软沉积物变形构造进行系统划分具有科学性、适用性和可行性,对其野外识别等具有科学价值,对深入研究其形态特征、组合特征、成因机理、沉积环境和构造背景等具有重要意义,但同时也存在一些不足之处,还需要进一步补充与完善。

致谢 衷心地感谢山东科技大学李阳、廖晨和孙斌同学在野外考察过程中提供的帮助。衷心地感谢审稿专家提出的建设性意见,为本文的修改和完善提供了宝贵的思路。

参考文献 (References)

- [1] Selley R C. An introduction to sedimentology[M]. London and New York: Academic Press, 1982: 233-238.
- [2] 赵激林, 刘孟慧. 湖相沉积岩中的同生变形构造及其地质意义[J]. 岩石学报, 1988, 4(4): 149-155. [Zhao Chenglin, Liu Menghui. Contemporaneous deformed structures in lacustrine sedimentary rocks and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 1988, 4(4): 149-155.]
- [3] van Loon A J. Soft-sediment deformations in the Kleszczów Graben (central Poland)[J]. Sedimentary Geology, 2002, 147(1/2): 57-70.
- [4] van Loon A J. Soft-sediment deformation structures in siliciclastic sediments: an overview[J]. Geologos, 2009, 15(1): 3-55.
- [5] Moretti M, Sabato L. Recognition of trigger 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(1/2/3/4): 31-45.
- [6] Oliveira C M M, Hodgson D M, Flint S S. Aseismic controls on *in situ* soft-sediment deformation processes and products in submarine slope deposits of the Karoo Basin, South Africa[J]. Sedimentology, 2009, 56(5): 1201-1225.
- [7] Owen G, Moretti M. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands[J]. Sedimentary Geology, 2011, 235(3/4): 141-147.
- [8] 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 seismites[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(4): 389-394.]
- [9] Moretti M, Pieri P, Tropeano M. Late Pleistocene soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in paralic deposits in the city of Bari (Apulian foreland, southern Italy)[M]//Ettensohn F R, Rast N, Brett C E. Ancient seismites, Special Paper 359. Boulder, CO: Geological Society of America, 2002: 75-85.
- [10] Mazumder R, van Loon A J, Arima M. Soft-sediment deformation structures in the Earth's oldest seismites[J]. Sedimentary Geology, 2006, 186(1/2): 19-26.
- [11] 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.]
- [12] Montenat C, Barrier P, d'Estevou P O, et al. Seismites: an attempt at critical analysis and classification[J]. Sedimentary Geology, 2007, 196(1/2/3/4): 5-30.
- [13] 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.]
- [14] 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.]
- [15] 乔秀夫, 郭宪璞. 新疆西南天山山麓侏罗统软沉积物变形研究[J]. 地质论评, 2011, 57(6): 761-769. [Qiao Xiufu, Guo Xianpu. On the lower Jurassic soft-sediment deformation of southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Geological Review, 2011, 57(6): 761-769.]
- [16] van Loon A J, Pisarska-Jamroz M, Nartišs M, et al. Seismites resulting from high-frequency, high-magnitude earthquakes in Latvia caused by Late Glacial glacio-isostatic uplift[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 5(4): 363-380.
- [17] Alfaro P, Delgado J, Estévez A, et al. Liquefaction and fluidization structures in Messinian storm deposits (Bajo Segura Basin, Betic Cordillera, southern Spain)[J]. International Journal of Earth Sciences, 2002, 91(3): 505-513.
- [18] Chen J T, Chough S K, Chun S S, et al. Limestone pseudoconglomerates in the Late Cambrian Gushan and Chaomidian Formations (Shandong Province, China): soft-sediment deformation induced by storm-wave loading[J]. Sedimentology, 2009, 56(4): 1174-1195.
- [19] Dawson A G. Linking tsunami deposits, submarine slides and offshore earthquakes[J]. Quaternary International, 1999, 60(1): 119-126.
- [20] Matsumoto D, Naruse H, Fujino S, et al. Truncated flame structures within a deposit of the Indian Ocean Tsunami: evidence of syn-sedimentary deformation[J]. Sedimentology, 2008, 55(6): 1559-1570.
- [21] Meshram D C, Sangode S J, Gujar A R, et al. Occurrence of soft sediment deformation at Dive Agar beach, west coast of India: possible record of the Indian Ocean tsunami (2004)[J]. Natural Hazards, 2011, 57(2): 385-393.
- [22] 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. [Lü Hongbo, Wang Jun, Zhang Haichun. Discovery of the late Mesozoic slump beds in Lingshan Island, Shandong, and a pilot research on the regional tectonics[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(6): 938-946.]
- [23] 吕洪波, 张海春, 王俊, 等. 灵山岛早白垩世复理石不是陆内三角洲沉积: 答钟建华教授[J]. 地质论评, 2013, 59(1): 11-14. [Lü Hongbo, Zhang Haichun, Wang Jun, et al. The early Cretaceous Flysch found in the Lingshan Island: not deltaic deposits on land: A reply to the argument from Professor ZHONG Jianhua[J]. Geological Review, 2013, 59(1): 11-14.]
- [24] 王安东, 周瑶琪, 闫华, 等. 山东省灵山岛早白垩世软沉积物变形构造特征[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 717-728. [Wang Andong, Zhou Yaoqi, Yan Hua, et al. Characteristics of soft-sediment deformation structures of the early Cretaceous in Lingshan Island of Shandong province[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 717-728.]
- [25] Alves T M. Submarine slide blocks and associated soft-sediment deformation in deep-water basins: a review[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 67: 262-285.
- [26] 葛毓柱, 钟建华, 樊晓芳, 等. 山东灵山岛滑塌体内部沉积及构造特征研究[J]. 地质论评, 2015, 61(3): 634-644. [Ge Yuzhu, Zhong Jianhua, Fan Xiaofang, et al. Study on internal sedimentary and structural features of the slump body in Lingshan Island, Qingdao, Shandong[J]. Geological Review, 2015, 61(3): 634-644.]
- [27] 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.]
- [28] Harris C, Murtton J, Davies M C R. Soft-sediment deformation during thawing of ice-rich frozen soils: results of scaled centrifuge modelling experiments[J]. Sedimentology, 2000, 47(3): 687-700.
- [29] 钟建华, 王冠民, 王夕宾, 等. 黄河下游冰成滑塌与塌陷构造的研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 261-266. [Zhong Jianhua, Wang Guanmin, Wang Xibin, et al. Study on the ice-induced slump and subsidence structures in the lower course of Yellow River[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 261-266.]
- [30] Weaver L, Arnaud E. Polyphase glacial deformation in the Waterloo Moraine, Kitchener, Ontario, Canada[J]. Sedimentary Geology, 2011, 235(3/4): 292-303.
- [31] 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(1): 283-294.
- [32] Põldsäär K, Ainsaar L. Extensive soft-sediment deformation structures in the early Darriwilian (Middle Ordovician) shallow marine siliciclastic sediments formed on the Baltoscandian carbonate ramp, northwestern Estonia[J]. Marine Geology, 2014, 356: 111-127.
- [33] 刘金华, 吴立峰, 乔力, 等. 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[J]. 地质论评, 2014, 60(5): 1019-1025. [Liu Jinhua, Wu Lifeng, Qiao Li, et al. Depositional model and characteristic of soft-sediment deformation structures of the Paleogene Dainan Formation in Gaoyou sag, North Jiangsu Basin[J]. Geological Review, 2014, 60(5): 1019-1025.]
- [34] 杜远生, 余文超. 地震和非地震引发的软沉积物变形[J]. 古地理学报, 2017, 19(1): 65-72. [Du Yuansheng, Yu Wenchao. Earthquake-caused and non-earthquake-caused soft-sediment deformations[J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(1): 65-72.]
- [35] 山穆珩. 地震岩问题[J]. 冯增昭, 刘敏, 译. 古地理学报, 2017, 19(1): 19-64. [Shanmugang G. The seismite problem[J]. Feng Zengzhao, Liu Min, Trans. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(1): 19-64.]

- [36] Owen G, Moretti M, Alfaro P. Recognising triggers for soft-sediment deformation: current understanding and future directions[J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235(3/4): 133-140.
- [37] Shanmugam G. Global case studies of soft-sediment deformation structures (SSDS): definitions, classifications, advances, origins, and problems[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 6(4): 251-320.
- [38] Seilacher A. Fault-graded beds interpreted as seismites[J]. *Sedimentology*, 1969, 13(1/2): 155-159.
- [39] Owen G. Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples[J]. *Sedimentology*, 1996, 43(2): 279-293.
- [40] 冯先岳. 地震振动液化形变的研究[J]. *内陆地震*, 1989, 3(4): 299-307. [Feng Xianyue. Study on the deformation caused by seismic vibrational liquefaction[J]. *Inland Earthquake*, 1989, 3(4): 299-307.]
- [41] Moretti M, Alfaro P, Caselles O, et al. Modelling seismites with a digital shaking table[J]. *Tectonophysics*, 1999, 304(4): 369-383.
- [42] 鄒继华, 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.]
- [43] 张斌, 王萍, 王建存. 岷江上游堰塞湖沉积中软沉积物变形构造成因讨论[J]. *地震研究*, 2011, 34(1): 67-74. [Zhang Bin, Wang Ping, Wang Jiancun. Discussion of the origin of the soft-sediment deformation structures in Paleo-dammed Lake sediments in the upper reaches of the Minjiang River[J]. *Journal of Seismological Research*, 2011, 34(1): 67-74.]
- [44] 冯增昭, 鲍志东, 郑秀娟, 等. 中国软沉积物变形构造及地震岩研究简评[J]. *古地理学报*, 2017, 19(1): 7-12. [Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Zheng Xiujuan, et al. Researches of soft-sediment deformation structures and seismites in China: a brief review[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(1): 7-12.]
- [45] 冯增昭. 一次成功的专题研讨会: “多成因的软沉积物变形构造及地震岩”[J]. *古地理学报*, 2017, 19(1): 1-6. [Feng Zengzhao. A successful symposium of “Multi-origin of soft-sediment deformation structures and seismites”[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(1): 1-6.]
- [46] 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 on the classification and genesis of soft-sediment deformation structure[J]. *Geological Review*, 2012, 58(5): 829-838.]
- [47] 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*, 2010, 40(8): 111-116. [Luan Guangzhong, Li Anlong, Wang Jian, et al. The geological origin division of the main sea island in Qingdao area and environment analysis[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(8): 111-116.]
- [48] 山东省第四地质矿产勘察院. 山东省区域地质[M]. 济南: 山东省地图出版社, 2003: 1-970. [Shandong Province NO. 4 Institute of Geological and Mineral Survey. Regional geology of Shandong Province[M]. Jinan: Shandong Cartographic Press, 2013: 1-970.]
- [49] 吕洪波, 张海春, 王俊, 等. 山东胶南灵山岛晚中生代浊积岩中发现巨大滑积岩块[J]. *地质论评*, 2012, 58(1): 80-81. [Lü Hongbo, Zhang Haichun, Wang Jun, et al. The huge slide block is found in late Mesozoic turbidite in Lingshan Island, Jiaonan, Shandong[J]. *Geological Review*, 2012, 58(1): 80-81.]
- [50] 张海春, 吕洪波, 李建国, 等. 山东青岛早白垩世新地层单位—灵山岛组[J]. *地层学杂志*, 2013, 37(2): 216-222. [Zhang Haichun, Lü Hongbo, Li Jianguo, et al. The Lingshanda Formation: a new lithostratigraphic unit of the early Cretaceous in Qingdao, Shandong, China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2013, 37(2): 216-222.]
- [51] 周瑶琪, 张振凯, 梁文栋, 等. 山东东部晚中生代构造—岩浆活动及原型盆地恢复[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 137-156. [Zhou Yaoqi, Zhang Zhenkai, Liang Wendong, et al. Late Mesozoic tectono-magmatic activities and prototype basin restoration in Eastern Shandong Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 137-156.]
- [52] Alsop G I, Marco S. Soft-sediment deformation within seismogenic slumps of the Dead Sea Basin[J]. *Journal of Structural Geology*, 2011, 33(4): 433-457.
- [53] 董晓朋, 吕洪波, 张星, 等. 山东灵山岛早白垩世复理石软沉积物变形期次解析[J]. *地质论评*, 2013, 59(6): 1060-1067. [Dong Xiaopeng, Lü Hongbo, Zhang Xing, et al. Stage analysis on the soft-sediment deformation in the Early Cretaceous Flysch, Lingshan Island, Shandong Province[J]. *Geological Review*, 2013, 59(6): 1060-1067.]
- [54] van Loon A J, Wiggers A J. Metasedimentary “graben” and associated structures in the lagoonal Almere Member (Groningen Formation, The Netherlands)[J]. *Sedimentary Geology*, 1976, 16(4): 237-254.
- [55] 张邦花, 田洪水, 张增奇, 等. 地质名山馒头山及其附近早寒武世古地震沉积事件研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(6): 1021-1031. [Zhang Banghua, Tian Hongshui, Zhang Zengqi, et al. Paleoseismic depositional events of the famous geological mountain-Mantoushan and its vicinity in the Early Cambrian[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(6): 1021-1031.]
- [56] Yang R C, Van Loon A J. Early Cretaceous slumps and turbidites with peculiar soft-sediment deformation structures on Lingshan Island (Qingdao, China) indicating a tensional tectonic regime[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 129: 206-219.
- [57] 杜芳鹏, 刘池洋, 王建强, 等. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组软沉积物变形特征及构造意义[J]. *现代地质*, 2014, 28(2): 314-320. [Du Fangpeng, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Characteristics and tectonic sense of soft sedimentary structures in Yanchang Formation, South Ordos Basin[J]. *Geoscience*, 2014, 28(2): 314-320.]
- [58] 邵珠福, 钟建华, 李勇, 等. 青岛灵山岛晚中生代重力流沉积特征及环境分析[J]. *地质论评*, 2014, 60(3): 555-566. [Shao Zhufu, Zhong Jianhua, Li Yong, et al. The sedimentary characteristics and environmental analysis of Late Mesozoic gravity flows in Lingshan Island[J]. *Geological Review*, 2014, 60(3): 555-566.]
- [59] 张传恒, 刘典波, 张传林, 等. 新疆博格达地区早二叠世软沉积物变形构造: 弧后碰撞前陆盆地地震记录[J]. *地学前缘*, 2006, 13(4): 255-266. [Zhang Chuanheng, Liu Dianbo, Zhang Chuanlin, et al. Early Permian seismically induced soft-sediment deformational structures in Bogda region, Xinjiang: stratigraphic records of earthquakes in the retroarc collisional foreland basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(4): 255-266.]
- [60] 钟建华, 倪良田, 邵珠福, 等. 几种较特殊的地震成因软变形沉积构造[J]. *地质科学*, 2015, 50(3): 665-683. [Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Shao Zhufu, et al. Study on several special sedimentary structures of earthquake-induced soft deformations[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(3): 665-683.]
- [61] Owen G. Load structures: gravity-driven sediment mobilization in the shallow subsurface[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, 216(1): 21-34.
- [62] 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: paleo-seismic records within strata[J]. *Geological Review*, 2008, 54(6): 721-730.]
- [63] Yamamoto Y. Dewatering structure and soft-sediment deformation controlled by slope instability: examples from the late Miocene to Pliocene Miura-Boso accretionary prism and trench-slope basin, central Japan[J]. *Marine Geology*, 2014, 356: 65-70.
- [64] 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.]
- [65] Finkl Jr C W. Sedimentary structures—II. Their character and physical basis: J.R.L. Allen, 1982. Vols. I, II. Developments in Sedimentology, 30A and 30B. Elsevier, Amsterdam, Vol. I: xvii + 593 pp., US\$98.00, Dfl.245.00; Vol. II: xiii + 663 pp., US\$104.00, Dfl.260.00[J]. *Earth-Science Reviews*, 1983, 19(4): 362-363.

- [66] 周瑶琪, 张振凯, 许红, 等. 灵山岛沉积物软变形构造特征[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(4): 42-54. [Zhou Yaoqi, Zhang Zhenkai, Xu Hong, et al. Soft-sediment deformation structures in the sediments at Lingshan Island[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(4): 42-54.]
- [67] Simms M J. Uniquely extensive soft-sediment deformation in the Rhaetian of the UK: evidence for earthquake or impact? [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 244(1/2/3/4): 407-423.
- [68] 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.]
- [69] 钟建华, 梁刚. 沉积构造的研究现状及发展趋势[J]. 地质论评, 2009, 55(6): 831-839. [Zhong Jianhua, Liang Gang. Situation of study and development tendency of sedimentary structure[J]. Geological Review, 2009, 55(6): 831-839.]
- [70] McLaughlin P I, Brett C E. Eustatic and tectonic control on the distribution of marine seismites: examples from the Upper Ordovician of Kentucky, USA[J]. Sedimentary Geology, 2004, 168(3/4): 165-192.
- [71] Rossetti D F, Santos Jr A E. Events of sediment deformation and mass failure in Upper Cretaceous estuarine deposits (Cameté Basin, northern Brazil) as evidence for seismic activity[J]. Sedimentary Geology, 2003, 161(1/2): 107-130.
- [72] 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.]
- [73] 刘颖, 谢君斐. 砂土震动液化[M]. 北京: 地震出版社, 1984: 1-255. [Liu Ying, Xie Junfei. Sand vibration liquefaction[M]. Beijing: Seismological Press, 1984: 1-255.]

Classification and Geological Significance of Soft-Sediment Deformation Structures of Lower Cretaceous in Lingshan Island

SUN FuNing^{1,2}, YANG RenChao², FAN AiPing², YOU JingQian³

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. School of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

3. Digital and Information Management Department, Changqing Oilfield Company of CNPC, Xi'an 710021, China

Abstract: Soft-sediment deformation structures (SSDS) are a series of structures which formed due to transformation of plastic sediment under the acting of liquidization and various driving forces after deposition but before lithification. SSDS are often developed in the strata with different scales, shapes, periods and origins. No doubt that earthquake is one of the most common causes of deformation of soft sediment, but it is not limited to this. SSDS are not a diagnosis of any specific trigger mechanism. According to the classification scheme of induced events, it is more applicable in the same event, but it is difficult to distinguish the real cause in "multi causes and same phenomenon" of the deformation. Therefore, the classification based on the origin is often limited. In fact, the driving forces are the most direct factors causing the deformation of soft sediments and directly control specific forms of deformation structures. In order to clarify their specific types and development, the study advocates the classification of SSDS according to different kinds of driving forces. Based on literature and outcrop investigation, Early Cretaceous gravity flows deposit in Lingshan Island are very developed with kinds of SSDS showing multi scales, forms, layers, periods and genesis. According to kinds of driving forces and morphology, SSDS can be classified into three types: SSDS driven by gravity acting on slopes; SSDS driven by gravity due to a reverse density gradient; SSDS driven by upward shear due to pore fluid. In addition, considering the development of SSDS in the interior of the slump of lower Cretaceous in Lingshan island, according to the types of stresses when the deformation structures were formed, SSDS driven by gravity acting on slopes are further divided into three subtypes: compression types, tension types and shear types. 3 categories of more than 10 kinds of SSDS are identified in the lower Cretaceous in Lingshan Island: SSDS driven by gravity acting on slopes including compression types (synsedimentary reverse faults and disordered compression deformation structures etc.), tension types (synsedimentary boudins, step faults and domino structures etc.) and shear types (some folds and fractures caused by shear and soft double structures etc.); SSDS driven by gravity due to a reverse density gradient including load structures, flame structures and ball-and-pillow structures etc.; SSDS driven by upward shear due to pore fluid including liquefied diaper, water-escape structures, convolute lamination and sandstone dykes etc. According to the types, development and distributions of SSDS, Early Cretaceous seismic activity was very frequent in Lingshan Island. The driving forces directly act on the soft sediment. And their types, strength, modes of action and duration affect the types, shapes and scales of the SSDS. Classification of soft-sediment deformation structures based on driving forces of lower Cretaceous in Lingshan Island can distinguish SSDS in the slump beds from the normal sedimentary layer, and can distinguish SSDS formed during the slump process from the earthquake process. This classification can clarify the dynamic mechanism of the deformation of soft sediment. Hence it is scientific, applicative and feasible to divide SSDS based on the driving forces. Discussion on classification of SSDS is benefit to facilitate its field identification and genesis analysis, and to provide a theoretical basis for other similar geological researches.

Key words: soft-sediment deformation structures (SSDS); Lingshan Island; lower Cretaceous; driving forces; classification