

# 软沉积变形构造的分类和形成机制研究

李勇<sup>1,3)</sup>, 钟建华<sup>1,2)</sup>, 邵珠福<sup>2)</sup>, 毛毳<sup>2)</sup>

1) 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640;

2) 中国石油大学(华东)地球科学系, 山东青岛, 266580; 3) 中国科学院研究生院, 北京, 10010;

**内容提要:**软沉积变形构造是指沉积物沉积之后、固结之前在处于软沉积物阶段时由于物理作用发生变形所形成的一系列构造。作为一种广泛发育的沉积构造,对其分类和成因机制的研究一直是国内外研究的热点。目前主流的分类方案是依据其成因机制为主再考虑其他因素将软沉积变形构造分为负载构造、包卷层理、变形交错层、滑塌构造、泄水和沉积物挤入构造、塌陷构造以及由生物和化学作用所形成的变形构造。而作为一种重要的软沉积变形构造,震积构造可以依据地震对沉积物改造的时间划分为同生、准同生和后生变形三种基本类型,而每一种基本类型可以分别受到伸展、挤压、剪切、液化以及震动而形成不同的软沉积变形构造。软沉积变形构造的触发因素多样,但主要是地震引起沉积物的液化产生的变形,因此可以按照沉积相分析、触发因素评估和标准评估三个步骤对软沉积变形构造的成因进行识别。作为一种广泛分布的沉积构造,软沉积变形构造成因机制的识别和判断仍然是其研究的一个重要方向;其次软沉积变形在地质工程方面的应用也是一个研究方向;最后,随着油气勘探走向深水,发现软沉积变形构造有关的油气藏也将是另外一个研究的方向。

**关键词:**沉积构造; 软沉积变形; 震积岩; 液化作用

作为一种常见的沉积构造,软沉积变形构造的研究,一直受到国内外学者的重视,在各个沉积岩教程中都专门对其分类和不同类型的软沉积变形构造的形成机制进行了论述(Blatt et al., 1980; Pettijohn, 1964, Allen, 1982; Davis, 1983; 曾允孚等, 1986; 赵澄林等, 1988; 朱筱敏, 2008)。尤其是最近二十年,这一方面的研究是沉积构造研究的最为活跃和最热门的内容(钟建华, 2009)。其中2005年在维也纳召开的欧洲地球联合会年会上将软沉积变形:重力、压实和构造应力的交互作用作为一个主题讨论,会后于2007年专门在《Sedimentary Geology》杂志上出版了一个专辑《野外和室内的软沉积变形构造》。鉴于不同学者对软沉积变形构造的成因解释存在的问题,2009年在意大利召开的第27届国际沉积学大会为标志,将“认识软沉积变形的触发机制”作为一个专题进行讨论(Owen et al., 2011),并于2011年在《Sedimentary Geology》杂志上作为专辑进行了出版。因此本文将根据国内外软沉积变形构造研究的最新成果,对软沉积变形构造的分类和形成机制进行总结。

## 1 软沉积变形的概念及识别特征

软沉积变形构造是指沉积物沉积之后、固结之前在处于软沉积物阶段时由于物理作用,如差异压实、液化、滑移、滑塌等影响而发生变形所形成的一系列构造(赵澄林等, 1988; 杜远生等, 2007; 杜远生, 2011)。通常认为软沉积变形过程中其内部的沉积颗粒或胶结物内部成分并不受到改变,只是原始沉积岩的颗粒发生了重新排列(Maltman, 1984, 1994; Waldron et al., 2011)。

对于软沉积变形也有学者曾将其称为同沉积构造、软岩石变形、沉积物变形构造、准同生变形构造、同生变形构造、早期成岩变形构造以及成岩前变形或卷曲层理(Maltman, 1984, 1994; 吕洪波等, 2003; Van Loon, 2009; Owen et al., 2011)。与其他由于后期构造运动所形成的构造相比,软沉积变形构造的主要识别标志有:①是处于软沉积阶段所发生的变化;②夹于未受扰动的正常沉积岩层之间;③遭受变形作用后还可以重新被生物所扰动;④与大规模区域构造体系相比,分布较局限;⑤与古构造(如同沉

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号41172093)、教育部高校博士点基金资助项目(编号20030425008; 20060425509)的成果。

收稿日期:2012-05-03; 改回日期:2012-07-30; 责任编辑:章雨旭。

作者简介:李勇,男,1977年生。中国科学院广州地球化学研究所在读博士研究生。主要研究方向为构造地质与油气成藏,非常规油气勘探。Email: yong77\_li@hotmail.com。

积断裂系)有一定关系,与现构造格局的关系不大;⑥缺少与岩浆期后活动有关的高温脉石矿物(赵澄林等,1988)。而 Lü Hongbo 等(2006)则提出识别软沉积变形构造与后期构造所产生的变形构造的两条基本识别标准:①所有的软沉积变形构造局限于特定的与构造褶皱无关的沉积地层,而构造形成的变形构造会涉及不同的地层并且仅仅发育褶皱的某些部位;②非构造成因的软沉积变形构造的分布不均匀并且没有明显的统一的构造指向,而构造成因的变形构造是在特定的构造应力场环境下形成的,因此其分布沿某些层位具有一定的规律或在地表出露沿着一致的方向。

## 2 软沉积变形构造的分类

软沉积变形构造的分类一直是国内外学者的研究热点,目前对软沉积变形构造的分类方案主要有三种(表1):

(1)第一种是依据软沉积变形的形态特征为主进行分类,如 Reineck 和 Singh(1973)按形态将软沉积变形构造划分为重荷构造、砂球和砂枕构造、包卷层理、碟状构造以及滑塌构造(包括扭曲构造)。Lowe(1975)则将砂岩液化和流化过程中产生的泄水构造分为软沉积物混合层、软沉积物侵入构造、固化层和软沉积物褶皱四种。吕洪波等(2003)则对南盘江盆地中三叠统复理石中发育的用沉积挤压构造进行了研究,根据外观形态将同沉积构造相应的划分为挤压褶皱、挤压岩枕、挤压皱脊和挤压裂隙,

通过实验对这些同沉积挤压构造的成因进行了模拟。

(2)第二种则是按照软沉积变形的形成机理或成因为主的分类,如 Blatt 等(1980)将软沉积变形分为重力作用的、液化作用的、滑塌作用的和由于剪应力引起的流动。Pettijohn(1964)、Potter 和 Siever(1972)则认为同生变形作用由垂向对流、蠕动—滑塌—滑动、液化等三种作用组成,并形成相应的构造类型。Selley(1982)将沉积期后的变形构造(互层的和层内的)划分为以垂向运动为主的塑性变形,如重荷模、假结核、包卷层理、平卧前积层、包卷纹理等;以水平运动为主的脆性变形,如滑动和滑塌。Mills(1983)则认为软沉积变形构造的形成机制主要为:液化和流体化作用、密度倒置、滑塌及斜坡失稳和剪切应力四种,并据此将软沉积变形构造划分为四种不同的类型。国内学者曾允孚和夏文杰(1986)按形成机理将同生变形构造划分为重力作用的、浪化作用的、在斜坡上移动—滑塌的,以及流动流体施加在沉积物表面剪切应力的变形构造等。VanLoon(2002,2009)则提出了一个基于成因机制的分类方案,首先它将形成机制分成三种,内作用力形成的变形构造、重力作用形成的变形构造和外作用力形成的变形构造,然后再按变形因素进行细分。

(3)此外也有学者结合形态和成因进行了综合分类,如 Allen(1982)将软沉积变形构造划分为:均一沉积物的重荷变形(再按照按剖面类型及重荷构造形态细分)、不均一沉积物的重荷变形(再按照按

表1 国内外软沉积变形构造的主要分类方案

Table 1 Classification of soft-sediment deformation structure

文献	主要划分准则	分类方案或常见类型
Weimer, 1975	形态	软沉积物的褶皱和断裂、卷曲纹层、球状和枕状构造、挤入构造、重荷构造和气胀构造
Selley, 1982	运动方式和形态	垂向运动为主的变形,包括重荷模、假结核、包卷层理、平卧前积层、包卷纹理,水平运动为主的变形,包括滑动和滑塌。
赵澄林等, 1988	运动方式和形态	以垂向运动为主,包括卷曲作用及其伴生构造和重荷作用及其伴生构造,以侧向运动为主包括滑动作用及其伴生构造和滑塌作用及其伴生构造,以液体逃逸为主包括泄水作用及其伴生构造和液化砂流上移及其伴生构造,膏—泥沉积物中的变形
吕洪波等, 2003	外观形态	根据挤压同沉积构造的形态将其划分为挤压褶皱、挤压岩枕、挤压皱脊和挤压裂隙
Oliveria, 2009	位置和运移方向	原位变形构造(如包卷层理,负载构造,火焰构造和液体逃逸构造),分离变形(包括滑塌,滑动和碎屑流)和挤入变形构造(包括碎屑液化脉和碎屑液化岩墙构造,砂火山构造)。
Van Loon, 2009	成因机制	按形成机制分成三种,内作用力形成的变形构造,重力扰动变形构造(包括天体冲击形成的变形构造,降水作用形成的变形构造,密度倒置形成的软沉积变形构造,压实作用形成的变形构造,块体向下滑动形成的变形构造)和外作用力形成的变形构造(包括生物扰动变形构造,冰或冰川扰动变形构造,温度扰动变形构造,水体扰动变形构造,化学因素扰动变形构造,风扰动变形构造)。
Owen and Moretti, 2011	变形机制和作用力	负载构造,包卷层理,变形交错层理,滑塌岩席构造,泄水构造与挤入构造,塌陷构造,生物和化学成因的软沉积变形构造

变形的复杂程度细分)、沉积物在斜坡上的滑动和滑塌作用(再按照层内是否扰动细分)和由水平剪应力引起的流动变形(再细分为单一的和复杂的两种类型)。Weimer(1975)将变形构造分为软沉积物的褶皱和断裂、卷曲纹层、球状和枕状构造、挤入构造、重荷构造和气鼓构造(见赵澄林等,1988)。而赵澄林等(1988)在研究渤海湾地区古近系湖泊沉积岩的软沉积变形构造时依据成因和形态将其划分为四种类型,以垂向运动为主形成的变形构造,包括卷曲作用及其伴生构造和重荷作用及其伴生构造。以侧向运动为主形成的变形构造,包括滑动作用及其伴生构造和滑塌作用及其伴生构造。以液体逃逸为主形成构造,包括泄水作用及其伴生构造和液化砂流上移及其伴生构造。Oliveira(2009)则依据软沉积变形构造与原始层的相对位置将软沉积变形分为原位变形构造(如包卷层理、负载构造、火焰构造和液体逃逸构造),分离变形(包括滑塌、滑动和碎屑流)和挤入变形构造(包括碎屑液化脉和碎屑液化岩墙构造、砂火山构造)。其中原位变形主要以物质垂向的运移为主主要受到垂直于层面的剪切力,而分离变形以侧向的平行于层面的剪切变形和运移为主,而挤入构造则分别有垂向和侧向的运移。Owen(1987,2003,2011)则在考虑了形态学和变形样式(包括驱动力、沉积物流变学、变形机制和相对于沉积的变形时间)方面对软沉积变形进行分类,

通过识别出的三种变形机制和五种驱动力并将软沉积变形构造分为负载构造、包卷纹层和层理、变形交错层、滑塌构造、泄水和沉积物挤入构造、塌陷构造。

由于地震是产生软沉积变形的一种重要因素,因此许多学者对地震所形成的构造进行了分类(表2;Seilacher,1969,1984;Shiki et al.,2000;Van Loon,2002;彭阳等,2004;Jackson et al.,2005;吕洪波等,2006,2011;Rodríguez-López et al.,2000,2007;Spalluto et al.,2007;杜远生等,2000;乔秀夫等,2008,2009;杨文涛等,2011;张斌等,2011)。Montenat(2007)首先依据沉积物的类型将震积岩形成的构造划分成地震对碎屑堆积物及硬岩层所产生的重力流(包括岩石崩塌,未固结岩层的堆积,如滑动滑塌变形,颗粒流,)、地震对硬岩层所产生的断裂(包括洞穴沉积物的裂缝和颗粒变形)和地震对软岩层所产生的变形(包括脆性变形和软变形两种)三种类型。乔秀夫和李海兵(2009)则以成因机制为主线,充分考虑到分类的适用性如易于野外辨认和简洁性及可扩展性等要素将震积岩划分为三大类而相应的将液化挤压形成的软沉积变形作为一种重要的类型,并依次划分成液化变形为主所形成的软沉积变形和挤压变形为主的沉积物变形,其中前者包括液化泄水构造、液化水压、液化底劈构造、液化卷曲与混滑层、液化溢出丘、负载球枕构造以及枕状层等,而后者则包括,丘一槽、板刺构造与直立紧

表2 国内外震积岩构造的主要分类方案

Table 2 Classification of seismite

文献	主要划分准则	分类方案或常见类型
Montenat,2007	地震对沉积物的影响	地震对碎屑堆积物及硬岩层所产生的重力流(包括岩石崩塌,未固结岩层的堆积,如滑动滑塌变形,颗粒流,)、地震对硬岩层所产生的断裂(包括洞穴沉积物的裂缝和颗粒变形)和地震对软岩层所产生的变形(包括脆性变形和软变形两种)三种类型
乔秀夫和李海兵,2009	成因机制	① 硬岩层及松散层在重力作用下异地堆积形成的震积岩,包括磨拉石,碎屑流和浊流等;② 软沉积物由于液化挤压作用而原地形成的变形构造,包括液化变形形成的液化泄水、液化水压、液化底劈、液化卷曲及混滑层、负载构造、球枕构造等,挤压变形形成的球槽构造,板刺构造和环形层;③ 硬岩层及弱固结岩层收到拉张作用在原地形成的脆性变形构造,如震裂角砾岩、粒序断层、地裂缝以及水成岩墙。
周勇等,2011	变形性质	软沉积变形构造(包括液化变形构造、拉伸变形构造、挤压变形构造三种)和硬岩层的脆性变形构造两种类型
杜远生,2011	综合分类	地震对沉积物改造的时间,将地震相关的软沉积变形构造划分为同生、准同生、后生变形三种基本类型,而每一种基本类型可以分别受到伸展、挤压、剪切、液化以及震动而形成不同的软沉积变形构造。如:① 同生变形构造的地裂缝、震碎角砾岩、同沉积断裂和微褶皱。② 准同生时期伸展、挤压、剪切形成的准同生断裂;震动形成的负荷构造、火焰构造、枕状构造、球状构造、柱状构造枕状层和震碎角砾岩;液化变形形成的液化脉、泄水构造、液化角砾岩、液化卷曲变形层理、砂火山、底劈构造、环状变形层理等。③ 后生地震事件形成的地震断裂和震裂角砾岩。④ 地震引发的其他因素所形成的构造,如地震引发的重力流由于重力变形等沉积形成的震浊流沉积以及水力破裂形成的水力破裂角砾岩

密褶皱、环形层。周勇等(2011)在对胶莱盆地地震积岩的研究中首先依据岩层的性质将其划分为软沉积变形构造(包括液化变形构造、拉伸变形构造、挤压变形构造三种)和硬岩层的脆性变形构造两种类型。而杜远生(2011)则依据地震对沉积物改造的时间,将地震相关的软沉积变形构造划分为同生、准同生、后生变形三种基本类型,而每一种基本类型可以分别受到伸展、挤压、剪切、液化以及震动而形成不同的软沉积变形构造。此外还有一些比较特殊的由地震形成的震积构造,如同沉积布丁构造(吕洪波等,2006,2011),环状层理(Calvo,1998;Rodríguez-López et al.,2000;袁静等,2006)、沉积灰岩墙(彭阳等,2004,2007,2009)。

综上所述可以看出,尽管在某些特定的软沉积变形构造的分类方面取得一定的成果,如震积岩的分类(Montenat,2007;乔秀夫等,2009;杜远生,2011;周勇等,2011)。但由于形成软沉积变形构造的作用机制比较复杂,一方面很多变形过程能形成同一种软沉积变形构造,而同一种变形机制作用又能产生不同的软沉积变形构造,因此目前还无法取得一个令人满意的分类,但考虑到分类方案的简洁性,野外易于识别性和有利于成因判断等因素看,Owen和Moretti(2011)的综合分类比较具有一定的代表性,可以在一定程度上满足野外识别和随后成因的判断要求。

### 3 软沉积变形构造形成机制和触发条件

软沉积变形构造的形成一般需要三个条件(Owen,2011):①一个能改变沉积物原始特征的驱动力;②一个促使沉积物变形的变形机制使沉积物从固态转变为液态,如沉积物液化作用(Allen,1977,1982);③一定的触发条件,如地震,海啸等。

#### 3.1 驱动力

与硬岩石变形主要是内作用力有关相比,软沉积变形的驱动力更复杂,除了内作用力外,外作用力对软沉积变形构造的形成更为重要,此外重力作用也是一个方面。概括起来引起软沉积变形的应力主要有:①斜坡所产生的重力,②不均一的负载,③由于密度倒置所引起的重力,④水或其他流体所产生的剪切力,⑤生物或化学作用所产生的应力。而驱动力的识别主要是通过变形构造的几何学特征和体系的初始特征进行重建。而一般软沉积变形常常受到多重作用力的影响,如地震诱发的泥石流中的

褶皱就是受到了外力和重力两种力的影响。

#### 3.2 变形机制

正确识别软沉积变形构造的变形机制对于确定变形的触发因素非常重要。通常情况下,软沉积变形主要包括粘塑性变形,颗粒间剪切作用变形和脆性变形。粘塑性变形是形成软沉积变形构造的主要变形机制。在粘塑性变形中只需要一些微弱的驱动力就可以产生变形(Allen,1982;Owen,1987;Maltman and Bolton,2003)。对于粘结比较强的粘土来说,触变性和敏感性是降低粘土矿物的粘结力的主要因素(Kotlia et al.,2004;Hansen et al.,2007)。而对于粘结力不强的沉积物来说,液化作用和流体化作用是最重要的变形机制。液化作用(Liquefaction)是指由于孔隙流体压力的增加或者是由于颗粒松散产生的塌陷而使颗粒自身的重量转移到密体系空隙中的液体上所形成的(Allen,1982;Lowe,1976;Owen,1996,2011)。而流体化(Fluidization)是指颗粒的重力由向上移动的流体牵引所承担(Lowe,1975,1976;Allen,1982;Owen,1987;Nichols et al.,1994;Frey et al.,2009;Owen and Moretti,2011)。这两种机制的主要区别在于液化作用没有外来的孔隙流体,而流体化作用则需要外来流体的补充(Owen,1996)。

颗粒间剪切作用变形是颗粒或颗粒团在受到超过正常沉积物强度的应力作用下所产生的沿粘结沉积物微剪切带或非粘结沉积物小断层发育的剪切作用力(Owen,1987),这种作用机制常常形成由于重力引起的滑塌构造和叠瓦构造。

脆性变形机制常发生在部分液化的沉积物中。如Weaver等(2011)在对加拿大安大略省Waterloo冰碛岩的研究中,识别出了由于下伏冰块融化所形成地堑构造,而记述震积岩中因脆性变形而形成的阶梯状断层的文章更多。此外脆性构造可能叠加并改造在液化状态下发生的韧性变形。

#### 3.3 触发因素

大多数软沉积变形构造的形成需要一定的触发因素,自然界中能够触发软沉积变形构造的因素很多,如地震、波浪、洪水、快速沉积以及地下水的运动(Owen et al.,2011)。鉴于地震是软沉积变形构造的一种重要触发因素,因此可将触发因素分为地震的和非地震的两种类型。

地震是最常见的一种沉积物液化的触发机制(Lowe,1975;Allen et al.,1972;Allen,1986;宋天锐,1985;Leeder,1987;乔秀夫等,1994,1996,2006,

2011; Obermeier, 1996, 2005; Owen, 1996, 2011, 杜远生等, 2000, 2007; Becker et al., 2002; 陈世悦等, 2003; 田洪水等, 2003; 张琴等, 2003; 殷秀兰等, 2005; 严兆彬等, 2005; Du Yuansheng et al., 2005; 吕洪波等, 2003, 2006a, 2006b, 2011, 2012; 黄宏伟等, 2007; Alsop et al., 2011; Koc Tasgin, 2011; Gibert et al., 2005, 2011; Ettensohn et al., 2011; Zhang Chuanhen et al., 2007; Wang Ping et al., 2011; 张斌等, 2011; 苏德辰等, 2011), 尤其是在现代的沉积物变形中, 可能起着关键作用。根据地震烈度对沉积物影响的研究表明沉积物的液化至少需要5.0~5.5级的地震(Berra et al., 2011)。由于地震是饱和水砂层沉积物发生液化作用的重要因素, 因此Owen (1996)曾专门设计了一套震动试验台来模拟在地震影响下不同变形机制所形成的软沉积变形构造, 其中由于重力作用所引起的液化砂岩斜坡的垮塌将受到简单剪切作用而形成平卧褶皱等变形构造, 在不均匀负载的作用下将会形成扭曲变形构造, 而在受到不稳定的密度梯度的情况下, 下伏液化层将产生小褶皱, 泄水构造以及负载构造; 在受到切线剪切作用下, 将产生平卧褶皱; 在受到垂直剪切作用下形成了泄水构造, 如砂火山构造, 柱状构造等。通过与地层中所发现的古代软沉积变形构造的实例对比, 该实验对探索软沉积变形构造的成因起到了重要的作用。此外Moretti等(1999)利用数字振动台模拟研究了地震触发的软沉积变形构造, 并认为地震所形成的泄水构造形态取决于地震前沉积物体系状态, 如在上覆薄层非渗透的泥岩的递变层理中, 形成了柱状构造, 而在有上覆泥岩的厚层砂岩则形成砂火山构造, 对于分选较差的砂岩中由于选择性液化作用形成了地震不整合面构造。而对于负载构造则可以由不均匀的负载和不稳定的密度差异产生。国内学者也对震积岩相关的软沉积变形构造以及滑塌构造和滑塌浊积体进行了实验模拟(吕洪波等, 2003; 张关龙等, 2006; 鄢继华等, 2007, 2009)。吕洪波等(2003)通过实验对南盘江盆地中发育的同沉积挤压构造的形成进行了模拟, 认为这些构造是在盆地接受大量沉积物的同时受到水平挤压所形成的, 因此这些构造记录了当时的水平挤压方向, 并可以用来恢复盆地当时的水平挤压方向。鄢继华等(2009)通过水槽模拟实验发现地震形成的变形构造的形成时间和分布位置都有一定的规律性: 同沉积断裂(阶梯状断层)主要发育在三角洲前缘斜坡, 形成于地震作用的强震期; 微褶皱纹理主要发育在

前缘斜坡坡脚, 形成于地震作用衰减早期; 液化砂岩脉主要发育于紧邻前缘斜坡的前三角洲。

对于非地震引发的软沉积变形构造, 目前的研究还不够成熟, 只在个别的触发因素上做过研究(表3)。许多学者对于冰川或冰冻所形成的软沉积变形构造进行了广泛的研究(Aber et al., 1992; Benn et al., 1996; Williams et al., 1996; Bennett, 2001; Hiemstra et al., 2003; Chunga et al., 2007; Phillips et al., 2007; Gruszka et al., 2007, 2011; Weaver et al., 2011)。如Anketell等(1970)根据Butrym等(1964)报道的在冰川边缘发育的融冻扰动构造的实验为软沉积变形构造的分析建立了一个物理基础(见Van loon, 2009)。Weaver和Arnaud(2011)对冰川成因的沉积物中形成的脆性和韧性变形构造进行了研究, 认为其中的软沉积变形构造是受到不同的因素形成的, 包括不稳定的沉积, 快速沉积, 冰块变形和沉积物重力流所形成的剪切作用。其中中期的冰作用形成挤压褶皱、布丁构造、剪切带、逆断层等变形构造。概括起来冰川以及冰冻作用形成软沉积变形构造的机制主要有: ①冰冻层融化产生高孔隙压力使岩层液化而发生变形, 形成如火焰构造, 负载构造和泄水构造。如Harris(2000)则通过离心模拟实验对冻土融化所产生的软沉积变形构造进行了研究, 认为在砂层覆盖粘土的情况下由于冻土的融化将会在泥层中产生超孔隙压力并发生液化, 在上覆砂层的作用下形成负载构造以及下覆泥层受到挤压而形成的火焰构造; ②下伏冰块或冰冻沉积物融化而使上覆沉积物发生滑塌而产生变形构造(Zhong Jianhua et al., 2005), 如钟建华等(2001, 2002)通过对黄河三角洲现代冰成滑塌构造的研究发现, 冬季形成的冰层在被后期的砂泥掩埋的情况下随着温度的升高, 冰块融化将使上覆沉积物发生滑塌和塌陷而形成滑塌构造; ③冰川或冰块或冰冻岩层在软沉积物上滑动形成变形构造, 钟建华(2008)在对柴达木盆地西部的变形构造的研究中, 认为第四纪广泛出现的变形构造是冰川刨耕作用形成的, 是由于冰川在柴达木湖边缘未固结的沉积物上运动时, 其重力和磨擦会使底部的松软沉积物发生变形, 在前端则会象犁一样刨耕松软沉积物, 形成冰川刨耕变形构造。

### 3.4 软沉积变形构造触发因素的识别

在对软沉积变形研究的过程中, 如何正确识别这些触发机制是很重要的, 这是因为: ①触发因素是沉积物变形历史不可分割的整体; ②一些触发

表3 非地震液化变形的主要形成机制(据 Owen 和 Moretti,2011,有修改)

Table 3 Non-seismic triggers for soft-sediment deformation structure  
(based on Owen and Moretti, 2011)

主要触发因素	变形机制	代表文献
地下水波动	孔隙流体压力周期性增加	Owen,1996;Massari et al. . , 2001
陨石冲击作用	冲击作用	Alvarez et al. , 1998;Van Loon,2009
冻土融化	孔隙流体压力增加	Harris et al. , 2000;钟建华,2002,2009; Horváth Z,2005
快速沉积负载	不均衡负载和密度梯度差异	Postma, 1983; Moretti et al. , 2001; Oliveira et al. , 2009
潮汐剪切力	剪切作用	Greb and Archer, 2007
海啸	孔隙流体压力周期性增加	Dawson, 1999;Matsumoto D,2008
风暴波浪	孔隙流体压力周期性增加	Molina et al. 1998; Alfaro et al. , 2002
水波	冲击作用(破碎浪)	Kerr and Eyles, 1991

因素如地震对同沉积盆地的构造研究非常重要的指示意义;③许多可能的触发因素,如地震,海啸和风暴浪这些极端事件代表了环境的极端情况,而对软沉积变形的分析有助于对重现这些大的地质事件的恢复具有重要的意义(Obermeier, 1996, 2005; Owen et al. ,2008)。许多学者在如何识别触发因素方面进行了研究,如 Jones 和 Omoto(2000)对日本东北部 Onikobe 和 Nakayamadaira 两个盆地晚更新世湖相砂泥岩中的软沉积变形构造进行了研究,并认为这些软沉积变形构造是一系列的变形机制所形成,包括流体化、液化、脆性断裂和粘性流。驱动力则包括了密度倒置、重力作用和不均匀负载。主要的触发机制为地震,此外还有火山砂的负载作用以及水下的水流,并在详细的研究基础上建立了地震因素的识别标志。

目前关于地震相关的软沉积物的识别标志研究得比较多,其中最早由 Sims 于 1975 年提出了 7 个地震触发的软沉积变形构造的识别标志(Sims, 1975),随后其他学者也提出了针对地震相关的软沉积变形构造的识别标志(Obermeier, 1996; Jones et al. ,2000; Etensohn et al. , 2002; Mazumder et al. , 2006; Montenat et al. ,2007; Moretti et al. ,2007; Berra et al. ,2011; Moretti et al. ,2011; Rossetti,2011)。目前认为与地震相关的软沉积变形构造的识别标志主要有:①空间区域内分布广泛;②侧向连续性;③垂向上的重复性;④软沉积变形构造形态特征与地震所形成的构造具有可对比性;⑤邻近活动断层;⑥变形带的复杂性和频率与距离断层的距离相关(Owen et al. ,2011)。但是上述标志并不仅仅局限于为软沉积变形构造的地震成因,因此确定地震成因变形必须详尽研究相关的区域地质背景构造

(乔秀夫等,2009)。

为了正确识别这些触发因素, Owen 和 Moretti(2011)提出了正确识别触发因素的三个步骤(图1):首先是进行沉积相分析,根据沉积相和软沉积变形构造出现的关系将决定触发因素是外源的还是内源的,软沉积变形构造应当和大多数已知发育该构造的沉积相一致;

第二步是进行触发因素评估,这就需要对所有的可能的触发因素的证据进行逐一的评估,并识别出最可能的触发因素;最后是进行标准评估,就是按照现有的标准对能支持最有利的触发因素的证据进行逐一评估。

#### 4 软沉积变形构造的研究方向

经过 150 多年的研究,对软沉积变形构造的研究已经取得了不少进展,尤其是在实验模拟和成因解释方面。然而由于软沉积变形构造的成因极其复杂,多种触发因素又常常互相叠加,因此在今后的研究中,对软沉积变形构造的成因解释还仍将是研究的一个重点,尤其是非地震相关的软沉积变形构造

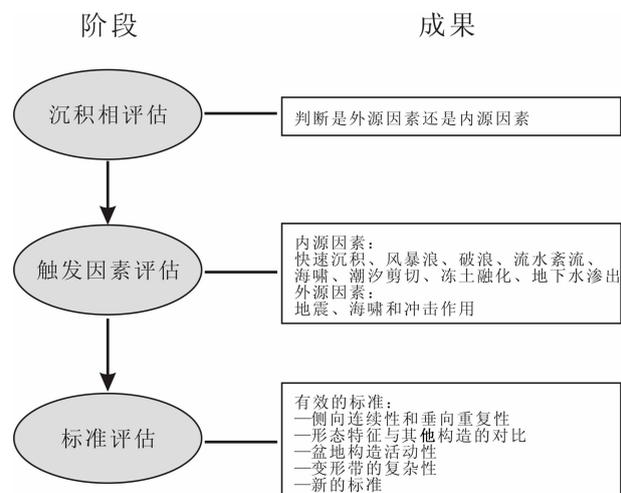


图1 软沉积变形构造触发因素的识别

(据 Owen 和 Moretti,2011 有修改)

Fig. 1 Recommended methodology for determining the trigger for soft-sediment deformation (Owen and Moretti, 2011)

的触发因素的识别标准的建立。

其次,软沉积变形构造在地质工程应用方面也是今后研究的一个重点,国外已经有学者将软沉积变形构造用在地质灾害评价方面。如 Van Loon (2006)根据对荷兰 Waal 河冲积平原的软沉积变形构造的观察,认为在冲积扇平原外围受到强大的逆流的影响,因此提出了避免在该处兴建新房屋的建议。而在对波兰的一处褐煤的露天煤矿中的大型的软沉积变形构造的研究中,学者提出了需要将煤矿的覆盖层移除以免造成重大的地质灾害的建议 (Brodzikowski et al., 1990; Van Loon et al., 1994)。

最后,软沉积变形构造对于深水油气勘探具有重要的意义。目前国外在北海油田和尼日利亚的深海已经发现了与软沉积变形构造有关的油气田 (Durant et al., 2004; Davies, 2003),在我国湖相沉积中与软沉积变形构造有关的油气显示也逐渐被发现 (杨剑萍等, 2008; 王化爱等, 2008, 2010; 石亚军等, 2009; 岳信东等, 2009; 钟建华等, 2011),因此对于软沉积变形构造的正确研究将对油气勘探起着重要的作用。

## 参 考 文 献 / References

杜远生,韩欣. 2000. 论震积作用和震积岩. 地球科学进展, 15(4): 389~394.

杜远生, Shi G, 龚一鸣, 徐亚军. 2007. 东澳大利亚悉尼盆地二叠系与地震沉积有关的软沉积变形构造. 地质学报, 81(4): 511~518.

杜远生. 2011. 中国地震事件沉积研究的若干问题探讨. 古地理学报, 13(6): 581~586.

陈世悦, 袁文芳, 鄢继华. 2003. 济阳坳陷早第三纪震积岩的发现及其意义. 地质科学, 38(3): 413~424.

黄宏伟, 杜远生, 黄志强, 陈海. 2007. 广西丹池盆地晚古生代震积岩及其构造意义. 地质论评, 53(5): 577~584.

吕洪波, 章雨旭, 夏邦栋, 方中, 周伟明, 彭阳, 吴智平, 李伟. 2003. ? 南盘江盆地中三叠统复理石中的同沉积挤压构造——一类新的沉积构造的归类、命名和构造意义探讨. 地质论评, 49(5): 449~456.

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

吕洪波, 章雨旭, 肖国望, 张绮玲. 2006b. 内蒙古白云鄂博南东黑脑包恩林忽洞群下部发现地震滑塌岩块. 地质论评, 52(3): 163~171.

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

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

彭阳, 胡贵昂, 陆刚, 章雨旭, 乔秀夫. 2004. 桂西北晚古生代地层中的沉积灰岩墙研究进展. 地质论评, 50(6): 613~620.

彭阳, 李岩, 胡贵昂, 陆刚, 乔秀夫. 2007. 广西桂林庙头上泥盆统融县组中的灰岩脉和角砾灰岩体及其成因. 地质论评, 53(6): 736~742.

彭阳, 陆刚, 胡贵昂, 周敏, 乔秀夫, 章雨旭. 2009. 广西凌云下甲二叠纪沉积灰岩墙和角砾灰岩体的成因及地质意义. 地质论评, 55(1): 43~48.

乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 彭阳, 李海兵, 高劼, 宋彪, 张巧大. 1994. 碳酸盐岩振动液化地震序列. 地质学报, 68(1): 16~32.

乔秀夫. 1996. 中国震积岩的研究与展望. 地质论评, 42(4): 318~320.

乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 李海兵, 彭阳, 张传恒, 章雨旭. 2006. 地层中地震记录(古地震). 北京:地质出版社, 1~263.

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

乔秀夫, 李海兵. 2009. 沉积物的地震及古地震效应. 古地理学报, 11(6): 593~610.

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

石亚军, 陈武杰, 曹正林, 李红哲, 王斌婷, 黄思静. 2009. 柴达木盆地西南区震积岩的发现及其引发的勘探启迪. 地质学报, 83(8): 1178~1184.

宋天锐. 1985. 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. 2011. 北京永定河谷中元古界雾迷山组软沉积变形与古地震发生频率. 古地理学报, 13(6): 591~614.

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): 121~131.

王化爱, 钟建华, 陈鑫, 高玉飞. 2008. 蒙古塔木察格坳陷白垩系震积岩特征及其地质意义. 地质学报, 82(6): 1088~1094.

王化爱, 刘广春, 杨玉平, 孟玮. 2010. 蒙古国南贝尔巴陷泥质软沉积变形构造特征及沉积序列. 油气地质与采收率. 17(6): 43~46.

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): 731~736.

鄢继华, 陈世悦, 姜在兴, 张关龙. 2007. 断陷湖盆震积岩成因模拟实验. 古地理学报, 9(3): 277~282.

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.

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记录及储积性能研究. 地质学报, 82(6): 805~812.

杨文涛, 汪校锋, 杨江海, 杜远生. 2011. 豫西义马地区中一晚三叠世古地震引起的软沉积变形构造. 古地理学报, 13(6): 635~644.

殷秀兰, 杨天南. 2005. 胶州—莱阳盆地白垩纪莱阳群中的震积岩及其大地构造意义讨论. 地质论评, 51(5): 503~506.

岳信东, 林春明, 李艳丽, 徐深谋, 张志萍, 漆滨汶, 王秀林, 张放东. 2009. 二连盆地白音查干凹陷下白垩统震积岩的发现及其地质意义. 高校地质学报, 15(1): 57~62.

曾允孚, 夏文杰. 1986. 沉积岩石学. 北京:地质出版社, 76~78.

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

张斌, 王萍, 王建存. 2011. 岷江上游堰塞湖沉积中软沉积变形构造成因讨论. 地震研究, 34(1): 67~74.

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

张琴, 朱筱敏, 张建军, 宋刚, 阎伟鹏, 张群伟. 2003. 酒西盆地青南凹陷柳沟庄—窟窿山地区下白垩统震积岩的发现及意义. 地质学报, 77(2): 158~162.

钟建华, 倪晋仁, 宋维奇, 王冠民, 马在平, 李勇, 刘华. 2001. 黄河三角洲上的冰成隆丘的研究. 沉积学报, 19(3): 357~362.

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

- 钟建华,许世红,王志坤,王海侨,马锋,段宏亮,阿不都热和曼·艾合买提江,周娟,刘云田,李勇. 2008. 柴西七个泉(第四纪)冰川刨耕变形层理的研究. *地质论评*,54(2): 207~215.
- 钟建华,梁刚. 2009. 沉积构造的研究现状及发展趋势. *地质论评*,55(6): 831~838.
- 钟建华,王德金,李佳,陈熙. 2011. 塔拉哈—齐家地区下白垩统震积岩特征及其油气储集问题. *地质找矿论丛*. 26(3): 304~310.
- 周勇,纪友亮,万璐,潘春孚. 2011. 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. *古地理学报*,13(5): 517~528.
- 朱筱敏. 2008. 沉积岩石学. 北京:石油工业出版社, 94~96.
- Aber J S. 1992. Glaciotectonic structures and landforms. *Encyclopedia of Earth System Science*, Vol. 2. San Diego: Academic Press, 361~378.
- Alfaro P, Delgado J, Estévez A, Molina J M, Moretti M, Soria J M. 2002. Liquefaction and fluidization structures in Messinian storm deposits (Bajo Segura Basin, Betic Cordillera, southern Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 91: 505~513.
- Allen J R L. 1986. Earthquake magnitude—frequency, epicentral distance, and soft-sediment deformation in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 46: 67~75.
- Allen J R L. 1982. Sedimentary structures, their character and physical basis, Vol. 2. *Developments in Sedimentology*, Vol. 30B. Amsterdam: Elsevier, 1~663.
- Allen J R L. 1977. The possible mechanics of convolute lamination in graded sand beds. *Journal of the Geological Society, London*, 134: 19~31.
- Allen J R L, Banks N L. 1972. An interpretation and analysis of recumbent—folded deformed cross-bedding. *Sedimentology*, 19: 257~283.
- Alsop G I, Marco S. 2011. Soft-sediment deformation within seismogenic slumps of the Dead Sea Basin. *Journal of Structural Geology*, 33: 433~457.
- Alvarez W, Staley E, O'Connor D, Chan M A. 1998. Synsedimentary deformation in the Jurassic of southeastern Utah: a case of impact shaking? *Geology*, 26: 579~582.
- Becker A, Colin A, Davenport C A, Giardini D. 2002. Palaeoseismicity studies on end- Pleistocene and Holocene lake deposits around Basle, Switzerland. *Geophysical Journal International*, 149: 659~678.
- Benn D I, Evans D J A. 1996. The interpretation and classification of subglacially deformed materials. *Quaternary Science Reviews*, 15: 23~52.
- Bennett M R. 2001. The morphology, structural evolution and significance of push moraines. *Earth Science Reviews*, 19: 591~612.
- Berra F, Felletti F. 2011. Syn depositional tectonics recorded by soft-sediment deformation and liquefaction structures (continental Lower Permian sediments, Southern Alps, Northern Italy): stratigraphic significance. *Sedimentary Geology*, 235: 249~263.
- Blatt H, Middleton G, Murray R. 1980. *Origin of Sedimentary rocks*, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc., 188~193.
- Brodzickowski K, Van Loon A J. 1990. Geological analysis of the overburden as a tool for safe and effective exploitation of the Beichatów opencast brown coal mine (central Poland). *Mining Science and Technology*, 11: 225~243.
- Chunga K, Livio F, Michetti A M, Serva L. 2007. Synsedimentary deformation of Pleistocene glaciolacustrine deposits in the Albese con Cassano Area (Southern Alps, Northern Italy), and possible implications for paleoseismicity. *Sedimentary Geology*, 196: 59~80.
- Dawson A G. 1999. Linking tsunami deposits, submarine slides and offshore earthquakes. *Quaternary International*, 60: 119~126.
- Davis R A. 1983. *Depositional systems: a genetic approach to sedimentary geology*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc., 92~97.
- Davies R J. 2003. Kilometer-scale fluidization structures formed during early burial of a deepwater slope channel on the Niger Delta. *Geology*, 31: 949~952.
- Duranti D, Hurst A. 2004. Fluidization and injection in the deep-water sandstones of the Eocene Alb Formation (UK North Sea). *Sedimentology*, 51: 503~529.
- Du Yuansheng, Shi G R, Gong Yiming. 2005. Earthquake-controlled event deposits and its tectonic significance from the Middle Permian Wandrawandian Siltstone in the Sydney Basin, Australia. *Science in China (Ser. D)*, 48: 1337~1346.
- Ettensohn F R, Zhang C, Gao L, Lierman R T. 2011. Soft-sediment deformation in epicontinental carbonates as evidence of paleoseismicity with evidence for a possible new seismogenic indicator: accordion folds. *Sedimentary Geology*, 235: 222~233.
- Ettensohn F R, Rast N, Brett C E. 2002. *Ancient Seismites: Geological Society of America, Special Paper*, 1~359.
- Gibert L, Alfaro P, García-Tortosa F J, Scott G. 2011. Superposed deformed beds produced by single earthquakes (Tecopa Basin, California): insights into paleoseismology. *Sedimentary Geology*, 235: 148~159.
- Gibert L, De Galdeano S, Alfaro P, Scott G, López Garrido A C, Lopez Garrido. 2005. Seismic-induced slump in Early Pleistocene deltaic deposits of the Baza Basin (SE Spain). *Sedimentary Geology*, 179: 279~294.
- Greb S F, Archer A W. 2007. Soft-sediment deformation produced by tides in a meizoseismic area, Turnagain Arm, Alaska. *Geology*, 35: 435~438.
- Gruszka B, VanLoon A J. 2011. Genesis of a giant gravity-induced depression (gravifossom) in the Enköping esker, S. Sweden. *Sedimentary Geology*, 235: 304~313.
- Gruszka B, Van Loon A J. 2007. Pleistocene glaciolacustrine breccias of seismic origin in an active graben (central Poland). *Sedimentary Geology*, 193: 93~104.
- Harris Ch, Murton J, Davies M C R. 2000. Soft sediment deformation during thawing of ice-rich frozen soils: results of scaled centrifuge modeling experiments. *Sedimentology*, 47: 687~700.
- Hiemstra J F, Rijdsdijk K F. 2003. Observing artificially induced strain: implications for subglacial deformation. *Journal of Quaternary Science*, 18: 373~383.
- Horvúth Z, Michéli E, Mindszenty A, Berényi-üveges J. 2005. Soft-sediment deformation structures in Late Miocene—Pleistocene sediments on the pediment of the Mátra Hills (Visonta, Atkár, Verseg): Cryoturbation, load structures or seismites? *Tectonophysics*, 410: 81~95.
- Jackson C A L, Gawthorpe R L, Carr I D, Sharp I R. 2005. Normal faulting as a control on the stratigraphic development of shallow marine syn-rift sequences: the Nukhul and Lower Rudeis Formations, Hammam Faraun fault block, Suez Rift, Egypt. *Sedimentology*, 52: 313~338.
- Jones A P, Omoto K. 2000. Towards establishing criteria for identifying trigger mechanisms for soft-sediment deformation: a case study of late Pleistocene lacustrine sands and clays, Onikobe and Nakayamadaira Basins, northeastern Japan. *Sedimentology*, 47: 1211~1226.

- Kerr M, Eyles N. 1991. Storm-deposited sandstones (tempestites) and related ichnofossils of the Late-Ordovician Georgian Bay Formation, southern Ontario, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28: 266 ~ 282.
- Koc Tasgin C. 2011. Seismically-generated hydroplastic deformation structures in the Late Miocene lacustrine deposits of the Malatya Basin, eastern Turkey. *Sedimentary Geology*, 235: 264 ~ 276.
- Kotlia B S, Rawat K S. 2004. Soft sediment deformation structures in the Garbyang palaeolake: evidence for the past shaking events in the Kumaun Tethys Himalaya. *Current Science*, 87: 377 ~ 379.
- Leeder M R. 1987. Sediment deformation structures and the palaeotectonic analysis of sedimentary basins, with a case-study from the Carboniferous of northern England. In: Jones M E, Preston R M F. Eds. *Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks*; London Geological Society, Special Publication, 29: 137 ~ 146.
- Lü Hongbo, Zhang Yuxu, Zhang Qiling, Xiao Jiafei. 2006. Earthquake-related tectonic deformation of soft-sediment sand; its constraints on basin tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 80: 724 ~ 732.
- Lowe D R. 1976. Subaqueous liquefied and fluidized sediment flows and their deposits. *Sedimentology*, 23: 285 ~ 308.
- Lowe D R. 1975. Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 22: 157 ~ 204.
- Maltman A J, Bolton A. 2003. How sediments become mobilized. In: Van Rensbergen P, Hillis R R, Maltman A J, Morley C K. eds. *Subsurface Sediment Mobilization*. London Geological Society, Special Publications, 216: 9 ~ 20.
- Maltman A J. 1994. *The Geological Deformation of Sediments*. London: Chapman & Hall, 1 ~ 362.
- Maltman A J. 1984. On the term "soft-sediment deformation". *Journal of Structural Geology*, 6: 589 ~ 592.
- Massari F, Ghibaud G, D'Alessandro A, Davaud E. 2001. Water-upwelling pipes and soft-sediment deformation structures in Lower Pleistocene calcarenites (Salento, southern Italy). *Bulletin of the Geological Society of America*, 113: 545 ~ 560.
- Matsumoto D, Naruse H, Fujino S, Surphawajruksakul A, Jarupongsakul T, Sakakura N, Murayama M. 2008. Truncated flame structures within a deposit of the Indian Ocean Tsunami: evidence of syn-sedimentary deformation. *Sedimentology*, 55: 1559 ~ 1570.
- Mazumder R, Van Loon A J, Arima M. 2006. Soft sediment deformation structures in the Earth's oldest seismites. *Sedimentary Geology*, 186: 19 ~ 26.
- Mills P C. 1983. Genesis and diagnostic value of soft-sediment deformation structures—a review. *Sedimentary Geology*, 35: 83 ~ 104.
- Molina J M, Alfaro P, Moretti M. 1998. Soft-sediment deformation structures induced by cyclic stress of storm-waves in tempestites (Miocene, Guadalquivir Basin, Spain). *Terra Nova*, 10: 145 ~ 150.
- Montenat C, Barrier P, Ott d'Estevou P, Hlbesch C. 2007. Seismites: An attempt at critical analysis and classification. *Sedimentary Geology*, 196: 5 ~ 30.
- Moretti M, Ronchi A. 2011. Liquefaction features interpreted as seismites in the Pleistocene fluvio-lacustrine deposits of the Neuquén Basin (Northern Patagonia). *Sedimentary Geology*, 235: 200 ~ 209.
- Moretti M, Sabato L. 2007. Recognition of triggering mechanisms for soft-sediment deformation in the Pleistocene lacustrine deposits of the Sant Arcangelo Basin (Southern Italy): Seismic shock vs. overloading. *Sedimentary Geology*, 196: 31 ~ 45.
- Moretti M, Soria J M, Alfaro P, Walsh N. 2001. Asymmetrical soft-sediment deformation structures triggered by rapid sedimentation in turbiditic deposits (Late Miocene, Guadix Basin, Southern Spain). *Facies*, 44: 283 ~ 294.
- Moretti M. 2000. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in middle-late Pleistocene aeolian deposits (Apulian foreland, southern Italy). *Sedimentary Geology*, 135: 167 ~ 179.
- Moretti M, Alfaro P, Caselles O, Canas J A. 1999. Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics*, 304: 369 ~ 383.
- Nichols R J, Sparks R S J, Wilson C J N. 1994. Experimental studies of the fluidization of layered sediments and the formation of fluid escape structures. *Sedimentology*, 41: 233 ~ 253.
- Obermeier S F, Olson S M, Green R A. 2005. Field occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering geologic analysis of paleoseismic shaking. *Engineering Geology*, 76: 209 ~ 234.
- Obermeier S F. 1996. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis—an overview 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. *Engineering Geology*, 44: 1 ~ 76.
- Oliveira C M M, Hodgson D M, Flint S S. 2009. Aseismic controls on in-situ soft-sediment deformation processes and products in submarine slope deposits of the Karoo Basin, South Africa. *Sedimentology*, 56: 1201 ~ 1225.
- Owen G, Moretti M, Alfaro P. 2011. Recognising triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions. *Sedimentary Geology*, 235: 133 ~ 140.
- Owen G, Moretti M. 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. *Sedimentary Geology*, 235: 141 ~ 147.
- Owen G, Moretti M. 2008. Determining the origin of soft-sediment deformation structures: a case study from Upper Carboniferous delta deposits in southwest Wales, UK. *Terra Nova*, 20: 237 ~ 245.
- Owen G. 2003. Load structures: gravity-driven sediment mobilization in the shallow subsurface. In: Van Rensbergen P, Hillis R R, Maltman A J, Morley C K. Eds. *Subsurface Sediment Mobilization*. London Geological Society, Special Publications, 216: 21 ~ 34.
- Owen G. 1996. Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples. *Sedimentology*, 43: 279 ~ 293.
- Owen G. 1992. A shaking table for experiments on soft-sediment deformation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62: 733 ~ 734.
- Owen G. 1987. Deformation processes in unconsolidated sands. In: Jones M E, Preston R M F. Eds. *Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks*. London Geological Society, Special Publication, 29: 11 ~ 24.
- Pettijohn F J, Potter P E. 1964. *Atlas and Glossary of Primary Sedimentary Structures*. New York: Springer, 1 ~ 370.
- Phillips E, Merritt J, Auton C, Gollledge N. 2007. Microstructures in subglacial and proglacial sediments: understanding faults, folds and fabrics, and the influence of water on the style of deformation. *Quaternary Science Reviews*, 26: 1499 ~ 1528.
- Postma G. 1983. Water escape structures in the context of a depositional model of a mass flow dominated conglomeratic fan-delta (Abrijo formation, Pliocene, Almería Basin, Spain). *Sedimentology*, 30: 91 ~ 103.
- Reineck H E, Singh I B. 1973. *Depositional Sedimentary Environments*. Berlin: Springer, 1 ~ 439.
- Rodríguez-López J P, Merléndez N, Soria A R, Liesa C L, Van Loon A J. 2007. Lateral variability of ancient seismites related to differences in

- sedimentary facies (the syn-rift Escucha Formation, mid-Cretaceous, Spain). *Sedimentary Geology*, 201; 461 ~ 484.
- Rodríguez-Pascua M A, Calvo J P, De Vicente G, Gómez-Gras D. 2000. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the Late Miocene. *Sedimentary Geology*, 135; 117 ~ 135.
- Rossetti D F, Bezerra F H R, Góes A M, Neves B B B. 2011. Sediment deformation in Miocene and post-Miocene strata, Northeastern Brazil: evidence for paleoseismicity in a passive margin. *Sedimentary Geology*, 235; 172 ~ 187.
- Selley R C. 1982. *An introduction to Sedimentology*. London: Academic Press, 233 ~ 238.
- Shiki T, Cita M B, Gorsline D S. 2000. Sedimentary Features of Seismites, Seismo-Turbidites and Tsunamiites. *Sedimentary Geology*, 135(1~4); 1 ~ 324.
- Sims J D. 1975. Determining earthquakes recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments. *Tectonophysics*, 29; 141 ~ 152.
- Seilacher A. 1969. Fault-graded beds interpreted as seismites. *Sedimentology*, 13; 155 ~ 159.
- Seilacher A. 1984. Sedimentary structures tentatively attributed to seismic events. *Marine Geology*, 55; 1 ~ 12.
- Spalluto L, Moretti M, Festa V, Tropeano M. 2007. Seismically-induced slumps in Lower-Maastrichtian peritidal carbonates of the Apulian Platform (southern Italy). *Sedimentary Geology*, 196; 81 ~ 98.
- Van Loon A J. 2009. Soft-sediment deformation structures in siliciclastic sediments; an overview. *Geologos*, 15; 3 ~ 55.
- Van Loon A J. 2002. Soft-sediment deformations in the Kleszczów Graben (central Poland). *Sedimentary Geology*, 147; 57 ~ 70.
- Van Loon A J, Brodzikowski K. 1994. Early diagenetic deformation structures in the overburden of the Bełchatów brown-coal mine (central Poland): a predictive tool regarding engineering geological conditions during exploitation. In: Wolf K H, Chilingarian G V. Eds. *Diagenesis, IV. Developments in Sedimentology*, 51; 49 ~ 77.
- Waldron J W F, Gagnon J F. 2011. Recognizing soft-sediment structures in deformed rocks of orogens. *Journal of Structural Geology*, 33; 271 ~ 279.
- Wang Ping, Zhang Bin, Qiu Weili, Wang Jiancun. 2011. Soft-sediment deformation structures from the Dixi paleo-dammed lakes in the upper reaches of the Minjiang River, east Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40; 865 ~ 872.
- Weaver L, Arnaud E. 2011. Polyphase glacial deformation in the Waterloo Moraine, Kitchener, Ontario, Canada. *Sedimentary Geology*, 235; 292 ~ 303.
- Williams G E. 1996. Soft-sediment deformation structures from the Marinoan glacial succession, Adelaide fold belt: implications for the palaeoaltitude of late Neoproterozoic glaciation. *Sedimentary Geology*, 106; 165 ~ 175.
- Zhang Chuanhen, Wu Zhengjie, Gao Linzhi, Wang Wei, Tian Yanlin, Ma Chao. 2007. Earthquake-induced soft-sediment deformation structures in the Mesoproterozoic Wumishan Formation, North China, and their geologic implications. *Science in China (Series D)*, 50; 350 ~ 358.
- Zhong Jianhua, Wang Haiqiao, Li Yong, Wang Yong, Wen Zhifeng. 2005. Ice-water pits upon the Yellow River delta plain. *Sedimentary Geology*, 187; 1 ~ 10.

## An Overview on the Classification and Genesis of Soft-Sediment Deformation Structure

LI Yong<sup>1, 3)</sup>, ZHONG Jianhua<sup>1, 2)</sup>, SHAO Zhufu<sup>2)</sup>, MAO Cui<sup>2)</sup>

1) *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640;*

2) *School of Geo-Science, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266580;*

3) *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100010*

**Abstract:** Soft-sediment deformation structures are formed due to disturbance of sediments during or after deposition, consolidation and burial but before significant diagenesis. As a kind of widespread sedimentary structure, many studies focused on its classification and genesis. According to the genesis mechanism, soft-sediment deformation structures can be classified as: (1) load structures, (2) convolute lamination and bedding, (3) deformed cross-bedding, (4) slump sheets, (5) water-escape structures and sediment-injection structures, (6) collapse structures, (7) structures of biological and chemical origin. As an important and special structure, seismic structure can be classified as syndepositional, penecontemporaneous and epigenetic deformation structures. Many factors can act as the triggers for the soft-sediment deformation structure, but the earthquake induced liquefaction is the most important one. The trigger and mechanism of the soft-sediment deformation are quite complex and can be identified by a process including faces analysis, trigger assessment and criterion assessment. Due to its important significance on many areas, the future study of the soft-sediment deformation will be still focused on the classification and identification of the mechanism. The application on the civil geological engineering is also an aspect for many geologists. With the oil exploration from shallow water to deep water, it is another studying area to find the oil reservoir related with soft-sediment deformation structures.

**Key words:** sedimentary structure; soft-sediment deformation structure; seismites; liquefaction and fluidization