

# 陆相湖盆沉积物滑塌变形研究进展

崔明明<sup>1)</sup>, 彭楠<sup>1)</sup>, 柳永清<sup>1)</sup>, 王宗秀<sup>2)</sup>, 旷红伟<sup>1)</sup>, 许克民<sup>3)</sup>, 李春麟<sup>2)</sup>

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037;

2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

3) 山东省地质调查院, 济南, 250014



**内容提要:** 陆相湖盆中沉积物滑塌常造成复杂的同沉积变形,对确定古地震事件、古地形等有重要作用,系统研究滑塌变形体系有助于厘清变形成因、理解变形机理和深化区域构造背景认识。本文梳理国内外滑塌变形研究进展,总结沉积物顺坡滑塌的形成条件、滑塌变形特征,尤其是滑塌褶皱的形态演化、伴生构造、对古斜坡的指示、有关滑塌变形的物理模拟等,并结合野外变形成因的识别,探讨滑塌成因与后期构造成因变形的有效鉴别标志。综合分析认为,陆相湖盆滑塌变形与重力流沉积密不可分,单一滑塌体的褶皱形态从滑塌体后缘到前缘由圆柱状褶皱、紧闭等厚直立褶皱转变为蘑菇状褶皱,演化过程可划分为多个阶段。在滑塌褶皱中存在逆冲断层、碎屑脉体、不规则侵蚀面、软布丁构造等,引起滑塌变形的机制可分为应力作用机制和液化作用机制。物理模拟因其可改变材料物理参数的优势,可能成为未来滑塌变形的重要研究方向。指出在鉴别滑塌成因变形和后期构造成因变形研究中仍然存在较多争议,其中未固结沉积物的活化、再改造、生物扰动、液化现象的存在是确定软沉积物变形的关键,变形构造在大尺度、层系规模上具有相同的应力场并与区域构造背景相符合是后期构造成因变形的最有力证据。

**关键词:** 滑塌变形; 软沉积物变形; 层间褶皱; 构造变形

陆相沉积物入湖时,位于斜坡上的浅地表沉积物受到一定因素触发可顺坡滑动,形成大规模的滑塌,在滑塌过程中可产生多种变形构造,变形形态具有复杂、奇特、多样的特征 (Shanmugam, 2013; Alsop et al., 2019)。物源供给和触发机制共同控制了滑塌体规模 (王成等, 2021),变形过程可分为滑塌变形、滑脱变形、震动液化变形等过程 (王熙和王明镇, 2013)。滑塌主要受滑塌体后缘滑断面控制,滑塌体内部的变形构造是对滑塌过程中应力变化的反映,可以揭示沉积物的受力状况和移动方向 (王龙樟等, 2018)。对这些变形构造的识别和应力研究,有助于沉积环境、古地形和古地震事件的确定 (钟宁等, 2017, 2021),并对现今常见的滑坡等地质灾害研究、油气勘探等具有重要意义 (李相博等, 2009; 邹才能等, 2009; 付锁堂等, 2010; 潘树新等, 2013; 何维领等, 2020; 杨田等, 2021a)。

早期研究对滑塌所产生的滑塌岩块、小型低角

度逆冲断裂、褶皱等变形多归因为地震事件 (吕洪波等, 2006a; 苏德辰等, 2013),揭示了盆地边缘的强烈构造活动 (袁效奇等, 2014),但是也有研究认为,具有不同几何特征的变形层理的出现可作为鉴别变形成因尤其是非震成因的可靠标志 (钟建华等, 2019),对这些变形构造非震成因的解释是滑塌变形研究的重要尝试。另一方面,滑塌时既有未固结成岩的软沉积物,也有裸露在地表的已固结基岩,所形成的变形包括软沉积物变形和基岩的脆性变形 (Waldron and Gagnon, 2011)。富含水的未固结沉积物与地下深部固结岩石在高温高压下都具有流动性,所形成的变形具有相似形态,极易在成因识别上造成混淆 (乔秀夫等, 2017),因此,正确厘定变形成因对科学认识区域构造演化至关重要。然而令人遗憾的是,目前仍然没有明确的鉴别标准来区分两种变形,早期研究所认为的只有在构造变形中存在的轴面劈理、变形构造的侵蚀截断等在软沉积物变形

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42288201,41688103,41672111)、中国地质调查局项目(编号:DD20221649, DD20190005)和中国地质科学院地质研究所科研结余经费项目(编号:S2008)的成果。

收稿日期:2022-02-13;改回日期:2022-08-11;网络首发:2022-08-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.08.035

作者简介:崔明明,男,1989年生,博士,主要从事沉积学研究;Email:cuiskd1988@163.com。通讯作者:彭楠,男,1983年生,博士,助理研究员,主要从事沉积地质学及古地理学研究;Email:pengnan19830120@126.com。

中也有发现 (Alsop and Marco, 2012a)。因此,仅靠变形形态和变形类别来判断变形成因极易造成识别上的偏差和错误解释,而确定古老岩石中变形构造形成时的岩化程度和变形成因显得尤为重要 (Elliott and Williams, 1988)。

本文起源于对灵山岛下白垩统莱阳群复杂层间褶皱的野外地质调查。吕洪波等 (2011) 发现了其中广泛存在的层间褶皱,并将其解释为滑塌褶皱,自此之后灵山岛的复杂变形一直吸引了众多学者的关注,并在沉积环境 (吕洪波等, 2011; 钟建华, 2012, 2020a; 邵珠福等, 2014; 李守军等, 2017)、构造背景 (周瑶琪等, 2015a; Yang Renchao and Van Loon, 2016; 孟元库和李日辉, 2019)、变形机理 (周瑶琪等, 2015b; Liang Zhao et al., 2018; 钟建华等, 2020b) 等方面存在较多争议。虽然目前的主流观点都将灵山岛的复杂变形解释为同沉积期的滑塌成因 (吕洪波等, 2011; 董晓朋等, 2014; 周瑶琪等, 2015b, 2017; Yang Tian et al., 2018; Li Shunli et al., 2020), 但一些变形迹象指示着后期构造成因的存在 (许克民等, 2021), 这些变形可能并不是简单的滑塌成因变形, 不能忽视对变形成因的精细厘定和构造成因的讨论, 而如何区分两种变形, 尤其是明确滑塌变形的特征就成为解决这一问题的关键。

有关复杂层间变形的解释, 在国外也存在较多分歧, 例如对 Newfoundland 中部低级变质岩中发育的褶皱, 早期研究多将其解释为滑塌褶皱, 但是 Elliott and Williams (1988) 后续的研究工作认为这些褶皱实际是在后期的构造变形中形成, 之前用作解释为软沉积物变形鉴定标志的一些特征是无效的。Waldron and Gagnon (2011) 根据褶皱核部砂岩与泥岩厚度差异、褶皱类型差异, 指出软沉积物变形时砂岩的能干性要弱于与之互层的泥岩层, 并可能存在后期构造变形叠加在早期的软沉积物变形之上。分析上述研究不难发现, 引起这些争议的关键在于两种成因的变形有极为相似的外观形态, 尤其是混杂堆积的具有复杂形态的褶皱变形, 早期研究多笼统地将其归为滑塌成因, 忽视了对褶皱及其伴生构造的其他成因的排除。本文通过综述近年来有关滑塌变形的研究进展, 对沉积物滑塌的形成条件、变形特征等进行系统的归纳和总结, 讨论滑塌过程中沉积物变形尤其是褶皱的形态特征, 与后期构造变形相对比, 力图鉴别两种成因的变形构造, 并抛砖引玉, 以期引起国内学者对这一特殊变形现象的关

注。

## 1 沉积物滑塌的形成条件

目前对陆相湖盆中沉积物滑塌已有较多研究, 在鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、四川盆地等均有发现 (表 1)。沉积物滑塌广泛存在于陆相湖盆、三角洲前缘、湖底扇、大陆边缘斜坡及海底斜坡等各种环境中, 在不同时代的地层中均有发育, 不局限于碎屑岩, 在碳酸盐岩中也有较多发现。变形构造以滑塌褶皱为主, 存在布丁构造、微断层、液化变形等, 对其成因解释多归结为火山、地震活动、波浪震荡等, 揭示了同沉积期的沉积物扰动和构造活动。

滑塌可产生多种沉积物重力流, 包括浊流、碎屑流、颗粒流等多种类型, 深水环境中可能还会产生等深流 (李华等, 2022), 并伴随有流体的转换事件 (谭明轩等, 2016; Li Shunli et al., 2020)。碎屑流是一种具塑性流变性质和层流状态的流体, 其主要支撑机制为基质强度和颗粒间的摩擦强度, 多见于斜坡环境 (高红灿等, 2012)。浊流以具有牛顿流体特征的紊流为主, 多发育递变层理, 其沉积物支撑机制是湍流 (Coussot and Meunier, 1996; 高红灿等, 2012)。

深水重力流研究在我国已有较长研究历史, 李相博等 (2019) 将其划分为浊流理论探索与发展阶段、浊流理论工业化应用阶段和砂质碎屑流研究阶段。李华等 (2022) 认为等深流和重力流可相互作用进而形成交互作用沉积, 并对挖掘油气勘探潜力和评估地质灾害有重要意义。陆相湖盆中影响重力流的因素有很多, 包括搬运方式、沉积过程、流态、流变学特征、支撑机制等, 基于不同的标准有不同划分方案。Middleton and Hampton (1976) 依据支撑机制将重力流划分为湍流支撑的浊流、基质支撑的碎屑流、分散压力支撑的颗粒流及逃逸流体支撑的液化流; Lowe (1982) 根据流变学特征和沉积物搬运机制分为流体流 (浊流和流体化流)、碎屑流 (液化流、颗粒流和黏性碎屑流); Posamentier and Martinsen (2011) 根据沉积过程将斜坡部位的重力流划分为蠕动、滑动、滑塌、塑性流、浊流和垮塌等过程, 认为水下重力流沉积物可归结为块体搬运沉积体系 (MTD) 和浊流沉积体系; Shamnugam et al. (1997) 也认为深水块体搬运沉积体系应全是砂质的, 只包括滑动、滑塌和碎屑流形成的沉积物。虽然之前对重力流的划分方案较多且对各分类中的术语定义存在较多分歧 (杨田等, 2021b), 但近年来更

表 1 不同成因的滑塌变形构造

Table 1 Slump deformation structures of different origins

| 研究区位置           | 地层时代              | 岩性       | 变形构造                             | 成因                         | 沉积环境            | 文献          |
|-----------------|-------------------|----------|----------------------------------|----------------------------|-----------------|-------------|
| 鄂尔多斯盆地南缘富平地区    | 中奥陶统赵老峪组 1~4 段    | 薄层灰岩     | 滑塌褶皱、角砾                          | 构造活动引发的地震                  | 碳酸盐岩古斜坡环境       | 袁效奇等, 2014  |
| 鄂尔多斯盆地西南部镇原地区   | 上三叠统延长组长 7 段      | 砂泥互层     | 滑塌变形                             | 基底断裂激发的地震、火山活动             | 半深湖—深湖相         | 何维领等, 2020  |
| 渤海湾盆地民丰注陷       | 始新统沙河街组 3 段       | 含砾砂岩、泥岩  | 包卷层理、砾石囊、泥岩撕裂屑、液化等               | 构造活动和物源供给                  | 湖底扇             | 宋明水等, 2021  |
| 渤海湾盆地东营凹陷       | 古近系沙三中亚段          | 砂岩、泥岩    | 包卷、揉皱变形、高角度小断层,砂岩脉               | 裂陷期频繁的断层活动                 | 三角洲斜坡           | 刘建平等, 2021  |
| 黄河三角洲——山东东营     | 现代黄河沉积            | 未成岩的沙和泥  | 液化变形、包卷层理                        | 波浪震荡导致下部沉积物液化,上部沉积物失去支撑而滑塌 | 三角洲             | 钟建华等, 2019  |
| 四川盆地开江—梁平裂谷     | 中二叠统栖霞组           | 碳酸盐岩     | 张裂隙、滑塌岩块等                        | 上扬子地块伸展裂解引起的地震活动           | 碳酸盐岩斜坡相         | 邓莉等, 2021   |
| 共和盆地            | 下三叠统隆务河组          | 砂岩、泥岩    | 同沉积褶皱、布丁块体                       | 地震及火山                      | 海底扇             | 刘炳强等, 2020  |
| 海拉尔盆地东明凹陷明 D2 井 | 下白垩统南屯组和大磨拐河组     | 砂岩、泥岩    | 包卷层理、液化管、漂浮岩块等                   | /                          | 三角洲前缘的重力流沉积     | 陈广坡等, 2018  |
| 滦平盆地滦页 1 井      | 下白垩统西瓜园组          | 泥岩和薄层砂岩  | 包卷层理、泄水构造、变形砾以及部分原生层理            | 火山、地震                      | 扇三角洲            | 王成等, 2021   |
| 内蒙古达茂旗黑脑包       | 寒武系—奥陶系 (?) 腮林忽洞群 | 薄互层的微晶灰岩 | 微断裂、布丁构造、不协调褶皱                   | 地震活动                       | /               | 吕洪波等, 2006a |
| 北京西山            | 寒武系               | 灰岩       | 小型层间微型断裂或褶皱,微型褶曲或断层和布丁,楔状构造和特殊砾岩 | 华北古板块的“翘翘板式运动”而发生的古地震      | 陆表海的滩外斜坡至盆地边缘环境 | 苏德辰等, 2013  |

多关注沉积过程对流体的影响(潘树新等, 2013; 秦雁群等, 2018), 和碎屑流与浊流的流体转换, 并且对研究沉积物顺坡滑塌而言, 根据沉积过程进行划分更能揭示滑塌中的变形构造分布。因此, 本文主要依据沉积过程, 基于块体搬运沉积体系和浊流沉积体系的划分方案来分析滑塌过程。

块体搬运沉积通常指与水下块体流相关的重力流沉积、搬运过程(Canals et al., 2004; Moscardelli and Wood, 2008; Shanmugam, 2011), 以具有固体流和宾汉流(Bingham plastic)特征的层流为主, 常见多样的塑性和脆性变形(图 1)。根据沉积物在斜坡上的不同部位, 可将块体搬运过程划分为滑动、滑塌、碎屑流等过程(潘树新等, 2013), 滑塌过程及其所形成的变形构造属于重力流和块体搬运沉积体系的一部分。对大陆斜坡环境下沉积物的滑塌, 也有研究称之为斜坡失稳等(秦雁群等, 2018), 可根据高分辨率地震剖面、野外地质露头及钻井岩芯等来

分析滑塌块体的规模、接触关系和变形构造(Alsop et al., 2019)。相对于大陆斜坡沉积物的滑塌而言, 陆相湖盆中的滑塌具有分布规模小的特点, 但是外部形态和变形构造却更加多样、复杂, 易产生滑塌陡崖、铲式正断层、软布丁构造、滑塌褶皱等多样的变形构造, 这些变形构造的特征和产状, 具有一定的应力指向性(Alsop and Marco, 2012b)。

滑塌的形成需要一定的坡度、可顺坡滑动的沉积体以及一定的触发因素等(刘寒, 2018)。地震活动、潮汐、快速沉积是最为常见的外界触发因素(Alsop and Marco, 2013; Jiang Hanchao et al., 2016; Liang Zhao et al., 2018; 钟建华等, 2019, 2020b), 此外, 松散沉积物的自身重力分量也可成为滑塌的驱动力(陈俊飞等, 2017)。高沉积速率、水合物分解、潮汐作用可引起沉积物内部孔隙流体的局部高压, 使得内部颗粒间的束缚力、抗剪切能力减弱, 当颗粒顺坡向下的重力分量或剪应力超过颗

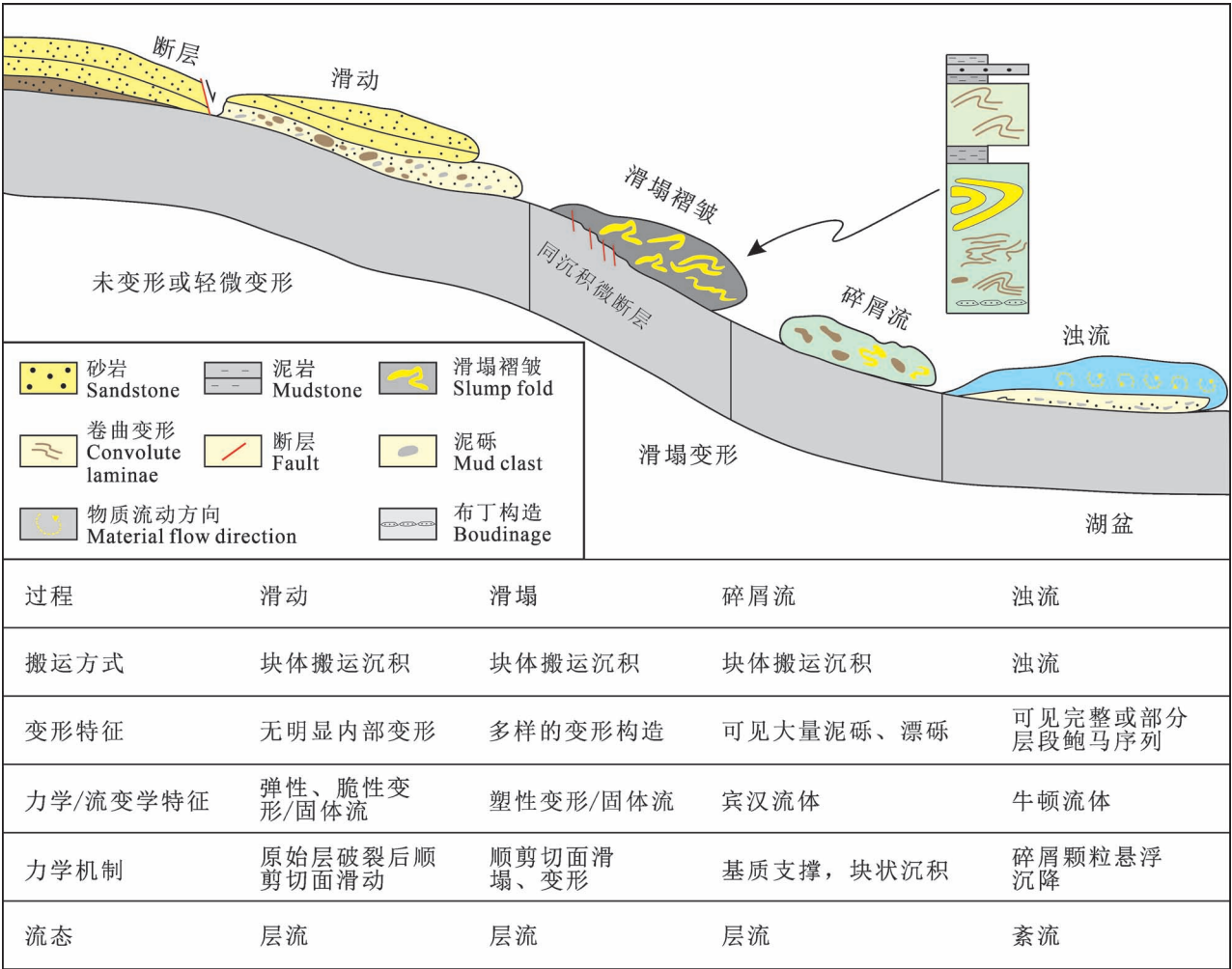


图 1 陆相湖盆重力流搬运过程及流体性质

Fig. 1 Transport process and fluid properties of gravity flow in continental lacustrine basin

粒之间的束缚力或抗剪切力时,可向下滑动,从而形成滑塌 (Mulder and Cochonat, 1996; Bryn et al., 2005; 王龙樟等, 2018; 全晓园等, 2020)。因此,在滑塌过程中沉积物主要受重力影响,并存在未完全固结沉积物的碎屑颗粒流动,从而形成多样的变形构造。

2 沉积物滑塌所引起的变形构造

沉积物顺坡滑动可形成重力驱动构造,受滑塌体的移动和堆积影响。在不考虑多期滑塌体复合作用前提下,单一滑动体的前部和后部分别形成挤压区域和伸展区域。在滑动体后部(也称初始滑移区)多为伸展区域,产生正断层、弧形滑断面和其他伸展构造(图 2a,图 2c),在滑动体的前方多为挤压区,可形成逆冲断层、褶皱等变形构造(Alsop and

Marco, 2012a; 乔秀夫等, 2017)。在滑动的未固结沉积物中,受孔隙水压力变化影响可形成液化现象,产生泄水构造、液化底劈、包卷层理等,并可能因为密度倒置而形成负载构造、火焰状构造、球枕构造等软沉积物变形。滑塌过程中若存在裸露基岩的滑动(图 2b),已固结基岩与原始岩层断裂后可形成破碎而独立的岩块,这些破碎的岩块一般没有内部变形,保留了原始层理,并可能发生旋转,与围岩的岩性和沉积特征不同,也有研究称其为固结岩石的地表变形,与野外常见的山体滑坡类似(Waldron and Gagnon, 2011)。本文主要针对未固结沉积物的滑塌变形,暂不过多涉及地表已固结基岩的滑塌变形。褶皱是滑塌过程中最为典型和常见的变形,在野外地质调查中极易与后期构造成因的小尺度褶皱相混淆。滑塌褶皱形成时,沉积物已经固结到一定

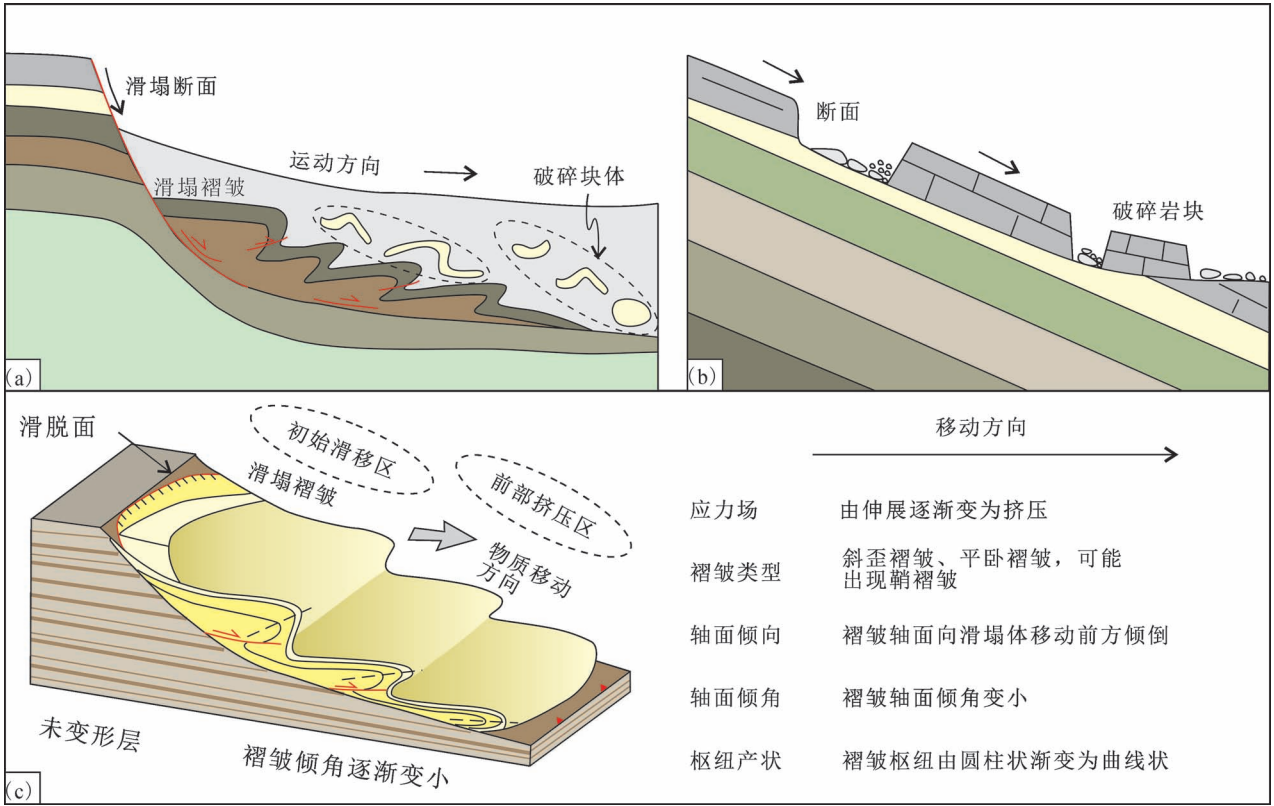


图2 理想情况下地表未固结沉积物、已固结基岩的滑塌变形特征

Fig. 2 Idealized slump deformation of surficial un lithified sediments and lithified bedrocks

(a) 未固结沉积物滑塌形成褶皱、断层、破碎块体等;(b) 已固结基岩顺坡滑塌形成的破碎岩块,保留原始层理;(c) 未固结沉积物滑塌示意图及单一滑塌体中褶皱产状随移动方向的变化(据 Alsop and Marco, 2012a 和乔秀夫等, 2017 修改)

(a) Folds, faults, and broken blocks induced by unlithified slump sediments; (b) broken blocks formed by slump of lithified bedrock, retaining its original bedding; (c) schematic cartoon of unlithified slump sediments and variation of fold occurrence with moving direction in single slump body (after Alsop and Marco, 2012a and Qiao Xiufu et al. , 2017)

程度且尚未完全岩化(Yang Renchao and Van Loon, 2016),但是目前的技术手段还无法定量地确定这一固结状态。野外常见的滑塌褶皱多存在杂乱现象,由于受重力控制,其褶皱也有局部方向性(图2c)。未固结沉积物顺坡流动时,与深部韧性剪切带的早期流动构造相似(乔秀夫等, 2017),因此,滑塌褶皱也有类似于构造成因褶皱的形态,并可形成鞘褶皱(Alsop et al. , 2017, 2019)。从滑塌体后缘到前缘,褶皱形态可发生一定的规律性变化,枢纽由柱状变为曲线状(乔秀夫等, 2017)。野外常见的滑塌一般不是孤立出现,存在多期叠加,早期滑塌形成后,若与下一次滑塌存在较长时间间隔,可沉积有较厚的水平地层,后期再次滑塌、褶皱,形成新的褶皱层,在垂向上产生重复的多期滑塌序列;若两期褶皱之间间隔时间较短,后期褶皱可对早期褶皱形成一定破坏,形成不规则的侵蚀现象,并改变褶皱的原始

形态(Alsop and Marco, 2012a)。

### 3 滑塌变形的典型特征

目前对滑塌变形已有较多研究,例如死海盆地晚更新世 Lisan 组发育的滑塌褶皱,已取得了较多研究成果(Alsop and Marco, 2011, 2012a, 2012b, 2013; Alsop et al. , 2016, 2017, 2019, 2020a, 2020b, 2021)。鉴于死海盆地中的滑塌变形体还未固结成岩,是软沉积物变形,变形特征较为典型且研究较为深入,本文以 Lisan 组的滑塌褶皱为例,基于前人已取得的研究进展,总结滑塌过程中褶皱形态变化、伴生构造特征、褶皱产状对古斜坡的指示等,介绍滑塌变形的主要特征。

#### 3.1 滑塌褶皱的形态变化规律

滑塌褶皱多局限于厚度不大的地层中,其上下为未变形的水平地层(Alsop and Marco, 2011,

2012b, 2013)。在同一套地层中可见多个滑脱面和多套褶皱层,指示了多期滑塌事件的叠加。滑塌体的规模一般差异较大,受非共轴的剪切作用影响,滑塌褶皱的两翼多不对称,形态不规则,核部和翼部存在不均匀加厚或减薄(图 3a)。滑塌体中可见圆柱状褶皱、紧闭等厚直立褶皱、同斜褶皱、蘑菇状褶皱等,也可见肠状褶皱和鞘褶皱(Alsop et al., 2016)。

在未固结沉积物滑动过程中,滑塌体系呈现规律性演化,Alsop and Marco (2011) 将滑塌褶皱的演化过程划分为启动、平移、中止、松弛和压实五个阶段(图 3b)。在起始滑移过程中,沉积物受到前部挤压应力作用,原始形态发生改变,逐渐弯折形成褶皱。同时,未固结沉积物也可受密度差异驱动,形成同轴的垂直运动,并有水平压缩,也可形成褶皱(Alsop and Marco, 2011)。随后在平移过程中受非同轴重力驱动,褶皱逐渐扩大,下部翼破裂,形成逆冲断层(图 3b)。在中止阶段褶皱水平缩短,上部翼形成逆冲褶皱,逆冲断层扩大化。在远离褶皱脊部的小尺度次生滑塌过程中,沉积物受非同轴的水平

运动影响,产生小尺度次生滑塌褶皱,在受后期压实影响时,褶皱翼部垂直缩短,形成蘑菇状褶皱(Alsop and Marco, 2011; 乔秀夫等, 2017)。滑塌过程中褶皱形态的变化可能受控于地形坡度的变化,并受连续层状沉积物之间的黏滞系数差异影响,而后者可能是产生沉积物之间剪切效应的基本变形机制(陈俊飞等, 2017)。

3.2 滑塌褶皱中的伴生构造

在沉积物滑塌过程中,除了受重力作用外,颗粒之间的孔隙流体压力、沉积物黏性强度差异、层间剪切力等也可影响碎屑颗粒的运动,在滑塌褶皱中形成与其相伴生的逆冲断层、穿层的碎屑脉体、软布丁构造、不规则侵蚀面等。

在滑塌褶皱中常见小型逆冲断层和碎屑脉体贯穿褶皱。逆冲断层的规模一般较小,切断褶皱翼部,断面可能存在成岩过程中沉积物析出或侵入的方解石脉体(Alsop et al., 2019)。碎屑脉体一般由液化成因的沙泥混合物顺沉积物之间的裂隙贯入,而这些裂隙多由地震作用形成(Levi et al., 2006,

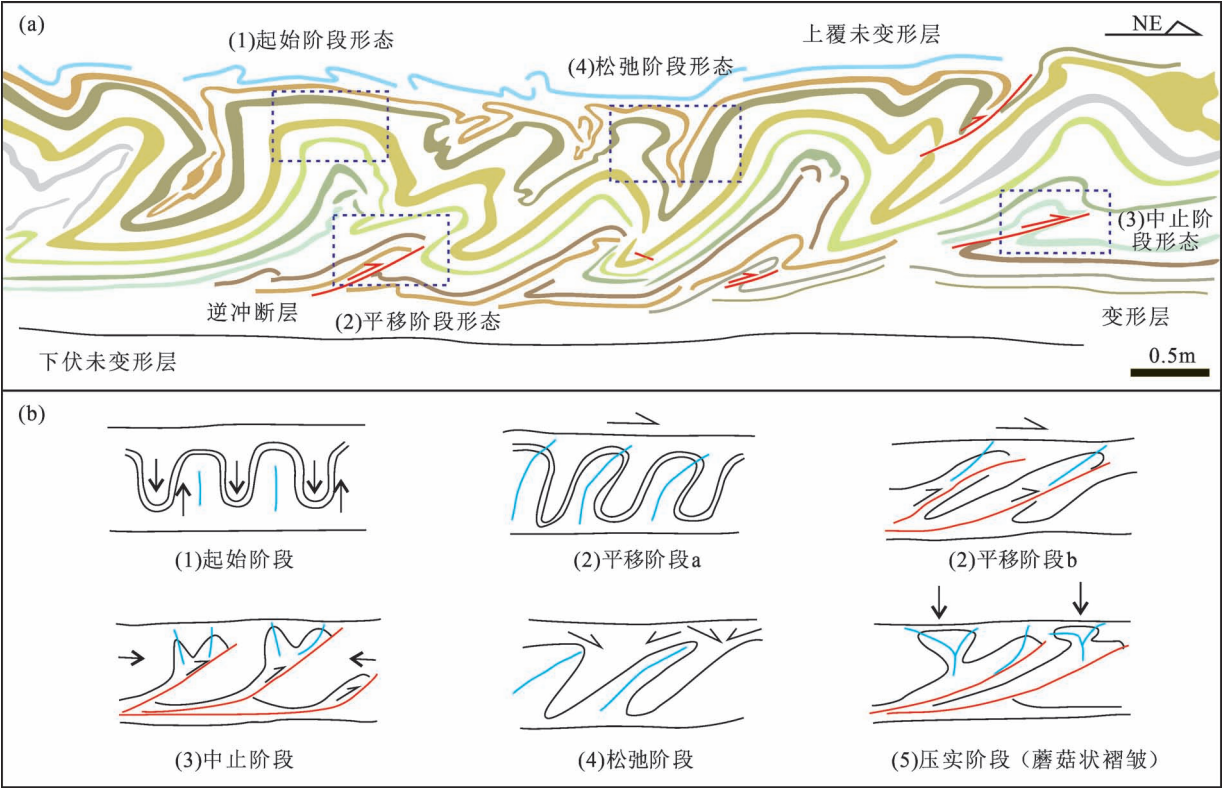


图 3 未固结沉积物滑塌过程中褶皱的形成及变化形态(据 Alsop and Marco, 2011 修改)

Fig. 3 Formation and morphology of folds in unlithified sediments at different slumping stages (after Alsop and Marco, 2011)

(a) 滑塌体中褶皱的几种不同形态素描;(b) 滑塌褶皱不同阶段的特征

(a) Sketches of different fold morphology in slump bodies; (b) characteristics at different stages of slump fold

2008)。碎屑脉体在垂向上可切穿多套滑塌体,沿碎屑脉体运移方向可追索到母岩层(图 4a),脉体内部存在平行于边界的条带(图 4b)(乔秀夫等, 2017)。碎屑脉体一般不平行于层理,在产状和规模上与后期侵入的岩脉有明显差异。

滑塌褶皱形成后,受新近沉积物的影响,褶皱翼部和核部多被上覆沉积物侵蚀、截断(图 4c),其侵蚀面可平行于上覆沉积物层理,也可有不规则形态,形成横向上厚度不等的沉积盖层(图 4d、e)。这一

不规则侵蚀面上下沉积物的岩性和沉积相一般有所差异,当上部为粗碎屑时会更加明显,形成冲刷—充填构造(赵激林和刘孟慧, 1988)。被侵蚀截断后的脆性碎屑、角砾可能会混合于上覆沉积物中,而盖层的碎屑物质也可能混入下覆沉积物中(Alsop et al., 2019),这些现象多是由沉积物活化或改造而成,具典型的同沉积成因特征。此外,滑塌褶皱形成后,有海啸等灾变事件发生时可改造褶皱层,形成褶皱产状在垂向上的规律性变化,并引起碎屑角砾等沉积

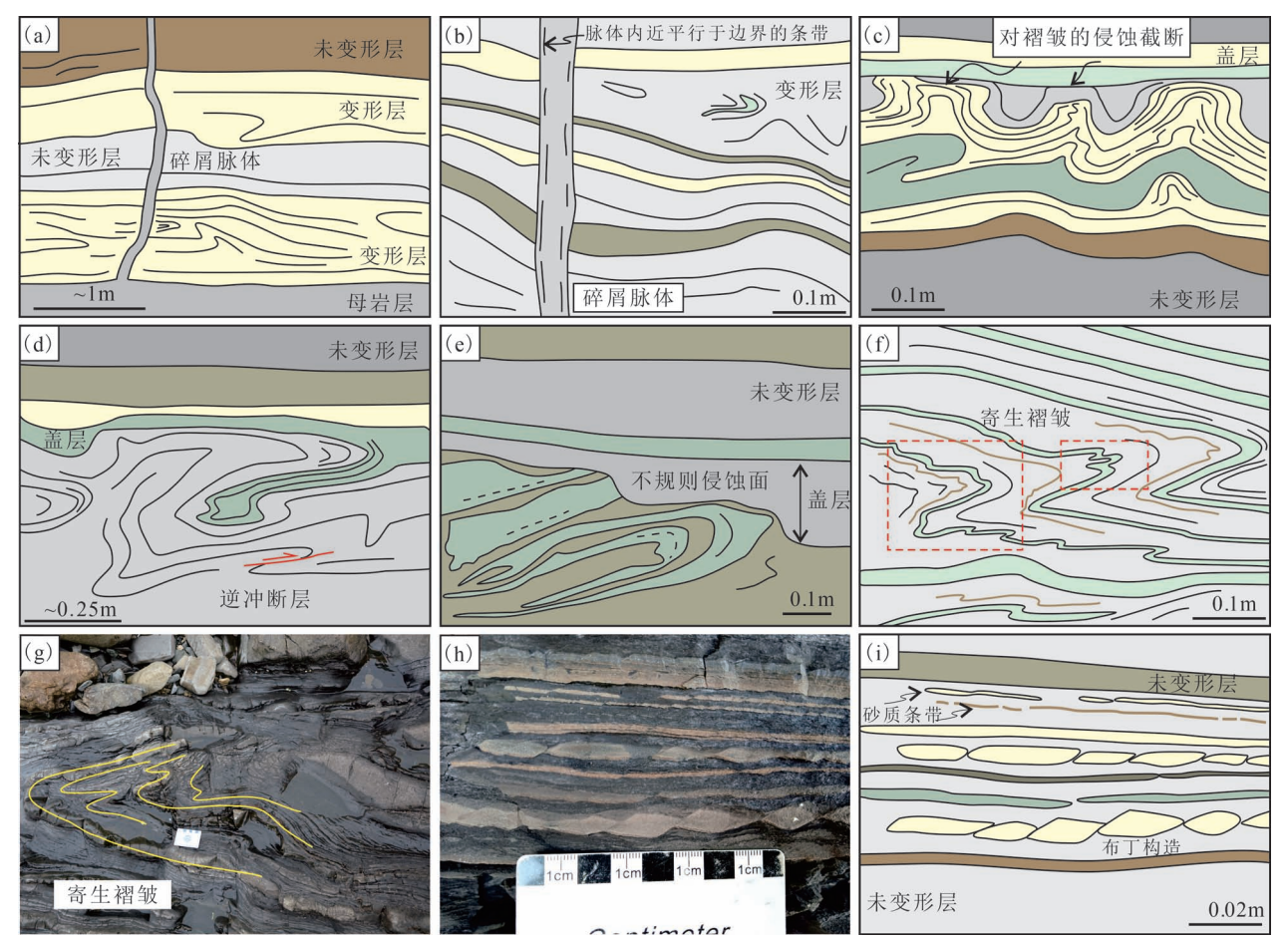


图 4 滑塌褶皱中的伴生变形[ (a) — (f) 据 Alsop et al., 2019 修改 ]

Fig. 4 Associated deformation structures in slump fold [ (a) — (f) after Alsop et al., 2019 ]

(a) —碎屑脉体贯穿多套滑塌体及其中的未变形层,多垂直或斜交于层理,下部可见母岩层;(b) —碎屑脉体内近平行于边界的条带;(c) —褶皱顶部被上覆沉积物侵蚀截断,与上部盖层界面多不规则;(d) —盖层在横向上厚度有所变化,并混入到下部变形沉积物之中;(e) —褶皱的侵蚀截断,形成不规则侵蚀面,盖层厚度变化;(f) —褶皱中的寄生褶皱,呈 S 型或 Z 型形态;(g) —褶皱中的寄生褶皱;(h) 和(i) —呈似叠瓦状排列的布丁构造,其成因未明确定论,(i) 为(h) 的素描图。(a) — (f) 为死海盆地晚更新世 Lisan 组典型变形的素描,据 Alsop et al., 2019 修改;(g) — (i) 为灵山县下白垩统法家垌组变形地层中的变形构造

(a) —Clastic dykes cross-cutting different slump bodies and their undeformed layers, mostly vertical or oblique to the bedding, host rock may be seen in lower layer; (b) —band in clastic dykes nearly parallel to the boundary; (c) —folds truncated by overlying sediments with irregular erosive surfaces; (d) —thickness of caps vary in laterally and mixes into the underlying deformed sediments; (e) —irregular erosive surface induced by truncated folds and varied cap; (f) —parasitic folds with geometry of S and Z; (g) —parasitic folds; (h) and (i) —imbricated arrangement of boudinage structures, with controversial origin. (a) to (f) are sketches of typical deformation structures in Dead Sea Basin, late-Pleistocene Lisan Formation; (g) to (i) are deformation structures in the deformed strata of Lingshan Island, Lower Cretaceous Fajiyang Formation

物的活化和改造(Alsop and Marco, 2012a)。

沉积物滑塌时,由于砂岩和泥岩没有完全固结成岩,其能干性差异与成岩之后的砂泥岩能干性差异不同。形成褶皱时能干性更弱的沉积层容易在褶皱核部增厚,能干性更强的沉积层在褶皱翼部形成S型和Z型寄生褶皱(图4f、g),这些寄生褶皱类似于构造活动带中变质岩的寄生褶皱,与上一级褶皱有一定的几何关系,较难区分(Waldron and Gagnon, 2011; Alsop et al., 2019),这也是造成褶皱不同成因解释的一个重要因素。

在一些地区的滑塌变形地层中也可能存在软布丁构造(Yang Renchao and Van Loon, 2016),与韧性变形地层中的构造布丁类似,对其成因的厘定较为困难(图4h、i)。虽然布丁构造多见于构造成因变形,但是在一些文献中,也有很多观点认为滑塌体中可出现非构造成因的布丁,现有实验也证实了某些类型的布丁构造可在软沉积物变形过程中形成(Zulauf et al., 2011; Marques et al., 2008, 2012)。关于软沉积物布丁构造的成因还存在一定争议,目前有两种主流观点,一种是由未固结的沉积物受拉伸应力而成(乔秀夫等, 2017),一种是由滑塌沉积中褶皱翼部的伸展区域受层间拉伸和剪切共同作用而成(Altermann, 1986; Alsop and Marco, 2011)。软布丁与构造布丁在形态上也较为相似,但是在软布丁中一般不存在方解石脉体、变质矿物、微观变形构造及其他后期变形迹象(乔秀夫等, 2017)。关于上述灵山岛的布丁构造,前人多将其解释为软沉积物变形,是受垂向重力挤压、侧向拉伸而成,并划分为肿缩构造和多米诺布丁两种类型,指示了当时的伸展构造背景(Yang Renchao and Van Loon, 2016; 葛毓柱和钟建华, 2017),但是布丁体之间的脆性、平直破裂面可能暗示了布丁体形成时的脆性裂缝张开,并且布丁体发生旋转,其长轴近平行于层理(图4h、i),是受侧向剪切而成,在未固结沉积物中难以出现这种状态,至少是已经固结到一定程度甚至完全固结成岩,因此,对这一变形的成因解析还值得商榷。

在一些重力流沉积案例中,包括滑塌形成的沉积物,底部泥岩受流体侵蚀时,可能存在撕裂泥屑。其形态和大小差异较大,分布较为杂乱,一般形成于高流速、含悬浮沉积物的强大水流对基底泥岩的侵蚀、撕裂,搬运后多在异地沉积和保存(杨田等, 2021a)。在这类流体搬运过程中,可能存在砂质碎屑流和浊流的转化,两者之间转化的机制和具体过

程是目前重力流沉积研究的热点(高红灿等, 2012; Yang Tian et al., 2018; Li Shunli et al., 2020),而撕裂泥屑的规模、空间分布、形态可能对界定两种流体有一定的指示意义,是应该重点关注的特殊沉积现象。

另外在显微尺度上,正常沉积过程中未固结的碎屑颗粒受流水或风等搬运介质影响,在横向上呈一定的优势方向排列,垂向上呈由粗到细或由细到粗的粒序变化,并受后期压实作用增强(Hiscott and Middleton, 1980)。当其受到地震、滑塌等扰动而液化时,可形成液化均一层,内部显微构造较为均匀,与滨海环境下沉积砂岩的微观特征较为相似(乔秀夫等, 2017),但是与构造变形中尤其是变质岩中的膨凸重结晶、旋转碎斑、S—C面理组构(一般在韧性剪切带中可见)等显微构造变形有明显区别,这可成为鉴别两种变形的有力证据。

### 3.3 滑塌褶皱的产状对古斜坡和湖盆的指示

滑动、滑塌体中存在的变形构造可作为古斜坡存在的标志,滑塌褶皱的产状、堆积厚度、区域分布,可以进一步指示古斜坡的方向。虽然滑塌体内部变形较为复杂多样,给人的印象是混乱的,并且相邻地层中的褶皱具有不同的规模和方向,使得滑塌褶皱的形态及传播特征难以用系统、科学的方法来表征(Bull et al., 2009),但是滑塌作为一种流动变形,其变形特征符合流体动力学的规律,流动过程主要受重力控制,对其进行精细的构造解析可以理顺褶皱产状及形态变化(Alsop and Marco, 2011; Alsop et al., 2019, 2020a)。

陆相沉积物被搬运至湖盆沉积时,受地震震动等因素触发形成滑塌,在滑塌体中,褶皱在重力作用下,轴面倾向上游,向滑塌体移动的前方倾倒,轴面倾向由近直立逐渐倒向滑动方向,倾角逐渐变小(图2c)。野外在一个大区域内统计褶皱产状时,轴面倾向一般具有一定的优势方向(图5),对枢纽和轴面进行赤平投影,枢纽和轴面极点一般沿大圆或大圆弧分布,当存在多期褶皱叠加时,枢纽和轴面极点会比较杂乱(乔秀夫等, 2017)。在盆地的多个方向都存在滑塌时,滑塌方向有所差别,但是统计多个地点或区域的褶皱产状制作玫瑰花图,将其投在平面图上,可以指示滑塌体的汇聚方向和湖盆的沉积中心(图5)。然而当存在多期滑塌扰动、逆冲断层的错断,并使滑塌体旋转一定角度时,会造成褶皱原始产状的变化,因此,并不是所有的褶皱都可以指示古斜坡和盆地沉积中心的方向,在利用褶皱产状来

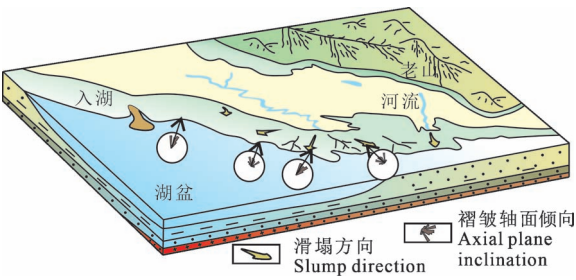


图 5 沉积物滑塌褶皱产状指示入湖方向示意图  
Fig. 5 Sketches of slump fold occurrence  
show entering direction to the lake

确定古斜坡时,需要排除褶皱枢纽错断和旋转的干扰,应该选择那些比较连续且指向明确的滑塌褶皱。

4 有关沉积物滑塌变形的问题与展望

目前对滑塌过程中沉积物的变形机制、形态演化等还存在较多问题,尤其是在滑塌变形的野外识别、滑塌体中变形构造的形成模式、与后期构造变形的区别等,近年来随着滑塌变形模拟研究的增多,为野外常见变形现象的解释提供了另一种方向。

4.1 沉积物滑塌所造成变形的常见机制

沉积物受地震等触发因素扰动,顺坡滑动,可伴随层间剪切、密度倒置、液化作用等,形成相对应的变形构造。早期研究将软沉积物的变形机制分为黏塑性变形、颗粒间剪切作用变形、脆性变形、液化流化作用等(Owen, 1996; Van Loon, 2002; 李勇等, 2012; 陈吉涛, 2020),考虑到变形时沉积物受重力、剪切应力、压实作用和液化作用共同影响,笔者等根据驱动力分为应力作用机制和液化作用机制,与 Owen and Moretti (2011)的划分方案类似。

应力作用机制为重力、层间剪切和压实作用,例如未固结沉积物受重力主导时,顺坡滑移至盆地平缓地段,下部滑动面受摩擦阻挡而逐渐停止,滑塌体上方相对于下方因重力惯性而继续向前,砂泥层形成褶皱(Shanmugam, 2000);在上下沉积层有明显密度差异,例如砂质层覆盖在塑性泥质层之上时,受差异压实影响,砂质层颗粒可向下移动,形成火焰状构造、负载构造等。

另一种变形机制是液化作用,富含水的砂质沉积物被上下低渗透泥质沉积物所隔挡时,颗粒之间的孔隙水与上下沉积物之间的流体自由交换被切断,孔隙水难以排出或排出较慢,产生暂时性的超压,引起了未固结砂质沉积物的液化,是形成泄水构

造、碟状构造等液化变形的基础。由于液化后砂岩强度要低于泥岩(Waldron and Gagnon, 2011),在斜坡上重力分量的驱动下,泥岩发生各种变形,砂岩则发生塑性流动,来适应变形留下的空间,呈现出枢纽部位砂岩厚度增加的形态,在整个褶皱形成过程中,砂岩呈现出Ⅲ类褶皱且枢纽增厚,泥岩呈Ⅰ类褶皱的特征。

4.2 滑塌变形的研究方向

早期对滑塌变形的研究多基于野外露头、岩芯和地震资料的解译,定性地描述变形现象,分析和排除可能的变形机理,进而与地震等地质事件相结合,揭示变形时的大地构造背景。受制于剖面 and 岩芯尺度观察到的滑塌变形有限,对滑塌变形构造的演化过程和变形机理的解释还不够明确,而在实验室中采用物理实验来模拟地表未固结沉积物滑塌的过程,进而研究其运动学过程,可以解析内部的变形机理(表 2)。

关于滑塌沉积的模拟研究主要集中在两个方面,一是通过砂箱模拟来重塑滑塌过程,并通过改变相关材料参数来研究滑塌的运动学机制和内部变形(Liu Zhina et al., 2014; 刘寒, 2018),二是利用人工造震的数字震动桌来模拟地震活动,触发形成与滑塌相似的软沉积物变形(鄢继华等, 2009)。

前者通过改变滑塌层材料的黏滞系数、摩擦属性、边坡坡角、软弱层厚度等几何参数,来研究软沉积物滑塌所产生变形构造的影响机制(表 2)。已有模拟证实上述因素不仅影响了滑塌中的正断层与压缩构造的分布规律,同时还影响了不同期次断层的滑距及其倾角、滑塌层的滑塌距离及滑塌变形体的体积等(Liu Zhina et al., 2013, 2014)。当黏滞系数不同的相邻层位发生相对滑动时,界面处因剪切而形成的变形可能是产生滑塌褶皱的基本机制,并形成倒转褶皱,这些褶皱被断层错断时可形成无根褶皱,并可能渐变为鞘褶皱(Dasgupta, 2008; 刘寒, 2018)。

后者通过模拟地震来触发软沉积物变形,将震动能量传递至富含水沉积物中,产生液化(Moretti et al., 1999),形成液化脉体、火焰状构造等,与野外实际观察到的变形具有高度相似性,并且一般认为液化强度会随距离震中的位置而有所变化,所形成的变形构造也会因震级、距震中距离而不同(Rodriguez-Pascua et al., 2000)。在这一模拟过程中一般难以形成褶皱,这也给模拟未固结沉积物顺坡滑塌带来了困难。

表 2 滑塌变形的模拟实验

Table 2 Simulation experiments of slump deformation

| 文献                                      | 变形构造的影响机制                                                          | 模拟环境       | 模拟方法     | 可变参数               |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------|----------|--------------------|
| Liu Zhina et al. , 2013, 2014; 刘寒, 2018 | 滑塌体基底属性,软弱层倾角与厚度影响了变形分布和变形样式。                                      | 边坡滑塌       | 散粒体边坡倒塌  | 软弱层倾角及厚度、边坡角度、材料参数 |
| 鄢继华等, 2004, 2007                        | 底形的变化结合外界触发机制容易在被破坏和改造的三角洲前缘造成滑塌,保存完好的三角洲前缘不易滑塌,地震可造成多种类型滑塌。       | 三角洲前缘      | 水槽模拟实验   | 地层厚度               |
| 张关龙等, 2006                              | 地震、波浪、砂体自身重力的压实沉降引起滑塌。                                             | 三角洲前缘      | 水槽模拟实验   | 改变模拟触发机制           |
| Dasgupta, 2008                          | 不同黏滞系数的材料相互滑动时,流变界面产生剪切变形,可形成滑塌褶皱,顺流动方向褶皱轴面旋转形成倒转褶皱、无根褶皱和鞘褶皱。      | 盆地斜坡       | 沉积箱模拟实验  | 材料的黏滞系数、沉积箱坡度      |
| 陈俊飞等, 2017                              | 地层坡角影响褶皱演化过程,软沉积物滑塌可细化为几个过程:滑移、形成圆弧—紧闭等斜褶皱、产生断裂、形成无根等斜褶皱和鞘褶皱、趋于平稳。 | 斜坡背景下的重力驱动 | 沉积箱模拟实验  | 沉积箱坡度              |
| Marques et al. , 2012                   | 不同层之间的黏性比控制褶皱形态。                                                   | 剪切带        | 简单剪切模拟实验 | 材料黏滞系数             |
| Moretti et al. , 1999; 鄢继华等, 2009       | 随地震能量差异,可形成砂岩脉、纹层卷曲变形、同沉积断裂以及液化均一层等。                               | 三角洲前缘      | 模拟地震实验   | 震动能量               |

有关滑塌的物理模拟可以解释一些野外常见变形构造的成因和形成过程,模拟过程自身也具有可改变材料性质、斜坡角度等参数的优势,对解决影响变形构造特征和变形过程的控制因素具有重要参考作用。对滑塌过程的模拟可能会成为未来研究滑塌变形成因机理和解决相关科学问题的重要方向。

5 滑塌变形中褶皱与构造成因褶皱的鉴别

变形构造尤其是软沉积物变形,种类较多,变形成因和触发机制也比较复杂,正如 Elliott and Williams (1988)所阐释,对所有变形构造的岩化程度和成因的研究超出了一定范畴,也难以对褶皱等变形进行精细的解析。因此,笔者等选择滑塌过程中最重要,也最容易引起争议的滑塌褶皱,来展开相关论述。

近年来随着对滑塌变形研究的不断深入,前期认为只有在后期构造变形中才会出现的特殊现象在软沉积物变形中也有发现,例如在前述的死海盆地 Lisan 组滑塌沉积体中,发现了呈 S 形和 Z 形形态的寄生褶皱(图 4f)。这些褶皱的最可能成因是沉积物能干性的差异,未固结砂岩层具有更大的孔隙度,保存了较多孔隙水,降低了颗粒间的抗剪切强度,使得砂岩层的能干性要弱于邻近的泥岩层,产生褶皱

形态变化形成寄生褶皱,并使寄生褶皱在上一级褶皱转折端改变收敛方向。由于该滑塌体现在还处于未成岩阶段,这些构造和组构已被证实为软沉积物变形(Alsop et al. , 2019)。虽然早期研究多认为轴面组构的存在是构造作用引起,但是 Lisan 组滑塌体中也发现有类似的轴面组构。非构造成因的轴面组构在其他一些文献中也有报道,例如 Elliott and Williams (1988)指出非构造成因褶皱中存在具有空间优势方向的轴面叶理,这一现象在墨西哥湾滑塌褶皱中也有发现(Moore and Geigle, 1974)。对这些轴面组构的成因难以形成明确的解释,不能明确证实是否由地表未固结沉积物滑塌形成,因为压实作用也可形成这种轴面组构(Maltman, 1981),这也造成了对这些组成因解释的巨大争议,但是这些组构在未固结沉积物中的出现,从侧面证实了寄生褶皱和轴面组构不能作为构造成因褶皱的关键证据。

一般认为滑塌褶皱作为软沉积物变形的一种,规模较小,局限于厚度不大的地层中,其上下地层均未遭受变形(乔秀夫等, 2017)。构造变形尤其是韧性剪切带里的变形,变形规模也可能很小,有研究认为小型的构造变形也可局限于顺层滑脱的地层中,其规模有限(Elliott and Williams, 1988; Waldron and Gagnon, 2011),野外地质调查也常见此类变形现象。因此,变形规模不能成为区分滑塌成因褶皱

与构造成因褶皱的主要依据,但是在不同地层单元中都出现的由同一应力场环境下产生的褶皱和断层,是构造事件的产物,而非软沉积物变形构造。

滑塌褶皱是主要受重力作用的浅地表层次变形,可破坏滑塌体之下的地层,不能破坏之后上覆的沉积物,难以形成上部沉积物的变形,除非存在另一期滑塌,而这样的改造属于另一期滑塌变形,这较易识别。滑塌过程多属于异地堆积过程(杜远生和余文超, 2017),其上的沉积物可能会与滑塌体有所差异,并对未固结的滑塌变形体有侵蚀破坏作用(赵激林和刘孟慧, 1988),形成侵蚀界面,也就是沉积物的活化再改造现象(Elliott and Williams, 1988),该侵蚀面多不规则,局限于薄层地层中(Alsop et al., 2019),界面之上沉积了后来的沉积物。由于此时沉积物处于未固结状态,如果存在生物活动,也可造成对变形构造的破坏,固结岩石中一般不会出现这一破坏情况。而液化构造必然是在沉积物处于未固结状态下形成的,固结岩石中难以出现类似现象(Owen and Moretti, 2011; Rodriguez-Pascua et al., 2016; Cui Mingming et al., 2022)。胶结程度不同可能带来形态的差异(吕洪波等, 2016)。因

此,变形构造中沉积物的活化、再改造、生物扰动、液化现象是软沉积物变形的明显标志。

构造成因褶皱的研究主要依据褶皱横截面上的等倾斜线、厚度参数、干涉样式将褶皱划分为三类五型(图 6a),分别是 I 类(顶薄褶皱和平行褶皱)、II 类(相似褶皱)、III 类(顶厚褶皱)(Ramsay, 1967)。已有研究证实这些构造褶皱的划分方案也适用于未固结沉积物的褶皱(Alsop et al., 2020a)。砂泥互层的沉积物形成褶皱时,砂岩层和泥岩层在能干性上会有所差异,能干性强的层形成 I 类褶皱,能干性弱的层形成 III 类褶皱并在转折端增厚,以填充褶皱后剩余的空间(图 6b)(Kenney, 1984; Bell, 2000)。正常成岩的砂岩能干性要强于泥岩,当砂岩层富含水甚至液化,但未达到液化的均一混合物时,沙层中颗粒状沉积物的有效强度可降低到接近零的水平,从而改变上述能干性差异,此时沙层能干性要弱于邻近的泥层(图 6c),从而形成 III 类褶皱并在转折端增厚(Waldron and Gagnon, 2011)。如果在褶皱中出现了砂岩呈 III 类褶皱且枢纽增厚,泥岩为 I 类褶皱,可说明变形时砂岩液化现象的存在,并可能存在液化砂岩脉对泥岩层的穿刺(图 6d),此时的变形为

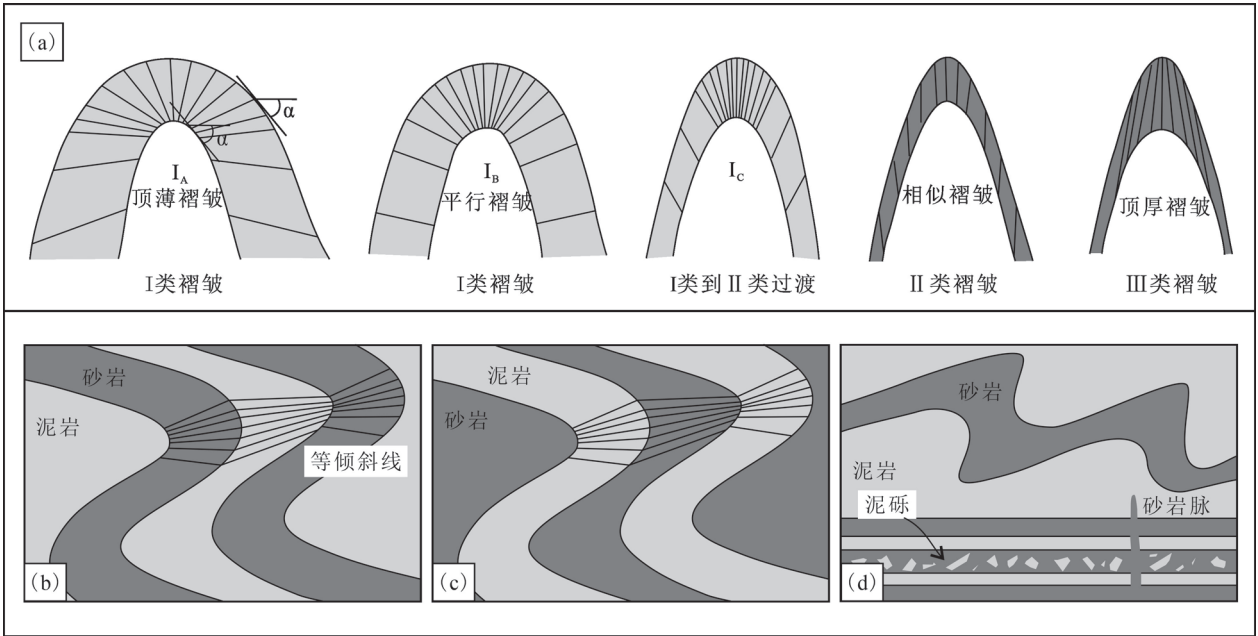


图 6 Ramsay 褶皱分类和理想褶皱模型(据 Ramsay, 1967 和 Waldron and Gagnon, 2011 修改)

Fig. 6 Ramsay fold classification and idealized fold model (after Ramsay, 1967 and Waldron and Gagnon, 2011)

- (a) 根据 Ramsay 分类的褶皱形态;(b) 低变质砂岩与泥岩互层中褶皱的几何形态,砂岩层内弧曲率更大,而泥岩层外弧曲率更大;  
(c) 未固结砂岩液化时形成的褶皱,几何形态特征与(b)相反;(d) 未固结砂岩变形中,砂岩脉刺穿上覆泥岩,可见泥砾  
(a) Fold classification by Ramsay, 1967; (b) geometry of folds in sandy and muddy strata deformed at low metamorphic grade, sandy layers show tighter curvature on inner arcs while muddy layers show tighter curvature on outer arcs; (c) folds induced by liquefied sediments with opposite geometry of (b); (d) clastic dyke in deformed and unlithified sandstone cross-cutting the overlying mud layer, and mud gravel can be seen

软沉积物变形而非后期构造变形,但是如果砂岩为Ⅰ类褶皱,泥岩为Ⅲ类褶皱并在转折端增厚时,是正常成岩过程中的变形,只能排除液化现象的存在,是否是构造变形还需谨慎。因此,液化现象的有无和褶皱类型可以成为区别软沉积物变形和后期构造变形的一个依据。

构造成因褶皱形成于一定的应力场环境之下,具有构造控制的产状一致性,虽然滑塌褶皱的构造要素也有一定的优势方向,但是滑塌褶皱的轴面倾向指向了盆地的沉积中心,并在横向上倾角有所变化(图 2c),在垂向地层中褶皱不会大范围存在,这也与 Lü Hongbo et al. (2006b)提出的识别软沉积变形与后期构造变形的标准相一致。当变形地层中存在侵入脉体、化石等时,后期的构造作用也可对其造成变形,而同沉积期的软沉积物变形难以对其造成变形。因此,识别构造变形的最佳方法之一是将区域内给定构造的几何和形态与整个地层序列、侵入脉体、变质杂岩、变形化石的产状联系起来(Elliott and Williams, 1988),如果能反映同样的应力场环境并可与区域地质背景相匹配,可成为构造变形的重要证据(图 7)。

另一方面,与上述软沉积物变形中不规则侵蚀面不同的是,构造成因变形后期抬升、裸露在地表后,被侵蚀形成的界面为一不整合面,多呈规则形态,可切穿多套地层,与上覆沉积物层理平行,其上下沉积地层一般具有不同的沉积相,并且在垂向上不会重复出现,但规模要更大一些。这些不整合面

的出现也是构造活动和变形的重要证据。

有关鉴别褶皱变形是未固结沉积物的滑塌成因,还是固结岩石的构造成因,还存在较多的争议和不确定,基于两种成因变形的最本质特征,笔者等认为未固结沉积物的活化、再改造、生物扰动、液化现象的存在是滑塌成因变形的关键,而变形构造在大尺度、层系规模上具有相同的应力场并与区域构造背景相符合,区域不整合面的出现是后期构造成因变形的最有力证据。

6 结论

通过梳理近年来滑塌变形的研究进展,总结出以下结论:

- (1)陆相湖盆中斜坡上的沉积物受地震活动、潮汐、快速沉积等因素触发时可形成滑塌变形,包括滑塌褶皱、负载构造、液化变形等,滑塌过程与重力流沉积密不可分。
- (2)单一滑塌体的褶皱形态从滑塌体后缘到前缘由圆柱状褶皱、紧闭等厚直立褶皱转变为蘑菇状褶皱,演化过程可划分为多个阶段,与构造成因褶皱具有相似性。
- (3)滑塌褶皱产状对古斜坡和湖盆有一定的指示作用,滑塌中存在逆冲断层、碎屑脉体、不规则侵蚀面、软布丁构造等,引起变形的机制可分为应力作用机制和液化作用机制。
- (4)物理模拟因其可改变材料物理参数的优势,可能成为未来滑塌变形的重要研究方向。
- (5)未固结沉积物的活化、再改造、生物扰动、液化现象的存在是确定软沉积物变形的关键;变形构造在大尺度、层系规模上具有相同的应力场并与区域构造背景相符合,区域不整合面的出现是后期构造成因变形的最有力证据。

**致谢:**成文过程中与中国地质科学院地质力学研究所高万里和李磊磊进行了有益探讨,野外地质调查得到了杨振瑞的帮助,审稿专家提出了宝贵修改意见,在此一并致以衷心的感谢。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈广坡,李娟,吴海波,彭威,李敬生,谢明贤,张斌,石小茜. 2018. 陆相断陷湖盆滑塌型深水重力流沉积特征、识别标志及形成机制—来自海拉尔盆地东明凹陷明 D2 井全井段连续取心的证据. 石油学报, 39(10): 1119~1129.

陈吉涛. 2020. 软沉积物变形构造研究进展. 地层学杂志, 44(1):

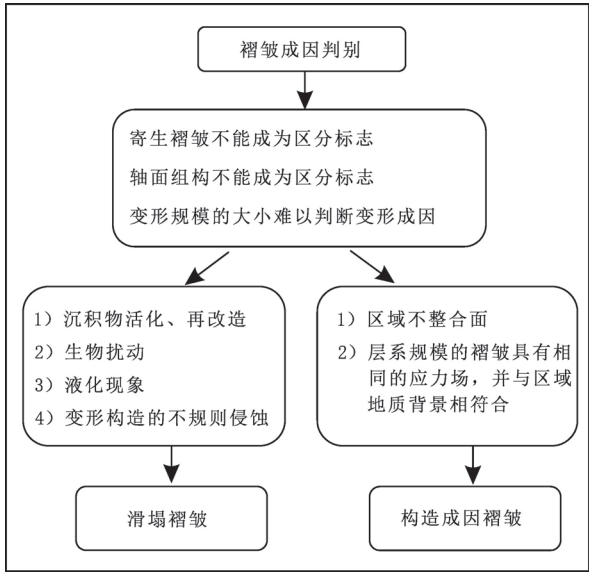


图 7 滑塌褶皱与构造成因褶皱的区分

Fig. 7 Indification of slump fold and tectonic fold

64~75.

陈俊飞,张昌民,朱锐,杨波,晏奇,卢晓林,朱爱国. 2017. 软沉积物滑塌变形物理模拟及变形机理分析. 古地理学报, 19(1): 139~146.

邓莉,闫全人,宋博,高山林. 2021. 中一晚二叠世上扬子地块(四川盆地)裂解的沉积响应. 岩石学报, 37(8): 2465~2482.

董晓朋,吕洪波,张星,张海春,王俊,张素菁. 灵山岛北端早白垩世复理石中的滑塌断崖. 2014. 地质论评, 60(4): 771~779.

杜远生,余文超. 2017. 地震和非地震引发的软沉积物变形. 古地理学报, 19(1): 65~72.

付锁堂,邓秀芹,庞锦莲. 2010. 晚三叠世鄂尔多斯盆地湖盆沉积中心厚层砂体特征及形成机制分析. 沉积学报, 28(6): 1081~1089.

高红灿,郑荣才,魏钦廉,陈发亮,陈君,朱登锋,刘云. 2012. 碎屑流与浊流的流体性质及沉积特征研究进展. 地球科学进展, 27(8): 815~827.

葛毓柱,钟建华. 2017. 灵山岛早白垩世软沉积物变形构造触发机制及其古环境意义探讨. 地质论评, 63(4): 927~940.

何维领,罗顺社,李昱东,吴悠,吕奇奇,席明利. 2020. 斜坡背景下沉积物变形构造时空展布规律—以鄂尔多斯盆地镇原地区长7油层组为例. 岩性油气藏, 32(6): 62~72.

李华,何明薇,邱春光,王英民,何幼斌,徐艳霞,何瑞武. 2022. 深水等深流与重力流交互作用沉积(2000—2022年)研究进展[J/OL]. [2022-03-28]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550>. 2022. 027.

李守军,张祥玉,赵秀丽,孙智新,张道元,章磊,徐磊,魏宁,刘宝梅. 2017. 山东省青岛市灵山岛下白垩统中发现鱼类和叶肢介化石. 地质论评, 63(1): 1~6.

李相博,刘化清,完颜容,魏立花,廖建波,马玉虎. 2009. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂质碎屑流储集体的首次发现. 岩性油气藏, 21(4): 19~21.

李相博,刘化清,潘树新,王菁. 2019. 中国湖相沉积物重力流研究过去、现在与未来. 沉积学报, 37(5): 904~921.

李勇,钟建华,邵珠福,毛鑫. 2012. 软沉积物变形构造的分类和形成机制研究. 地质论评, 58(5): 829~838.

刘炳强,邵龙义,王伟超,黄献好,刘文进,张少林,张浩,鲁静. 2020. 重力流主导的深水沉积特征及其模式—以共和盆地下三叠统为例. 地质学报, 94(4): 1106~1127.

刘寒. 2018. 滑塌构造变形机理及其影响因素的物理模拟研究. 导师: 刘志娜. 北京: 中国石油大学(北京)硕士学位论文: 1~56.

刘建平,鲜本忠,张莉,苏明,李宇志,闫海清,王震,陈鹏. 2022. 渤海湾盆地东营凹陷碎屑流主控型深水体系沉积过程及模式. [J/OL]. [2022-03-28]. 中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210302.1616.005.html>.

吕洪波,章雨旭,肖国望,张绮玲. 2006a. 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(2): 163~169.

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,章雨旭,张海春,冯雪东,秦贝贝,康康力,郑大燃,李莎,张琦,董晓朋,唐軻,朱桂繁. 2016. 乌拉特后旗测老庙拗陷西北缘—典型入湖三角洲剖面露头简介—一测老庙拗陷地质研究和实习基地典型露头之二. 地质论评, 62(1): 229~234.

孟元库,李日辉. 2019. 青岛灵山岛及邻区早白垩世大地构造演化. 地质论评, 65(2): 385~388.

潘树新,郑荣才,卫平生,王天奇,陈彬滔,梁苏娟. 2013. 陆相湖盆块体搬运体的沉积特征,识别标志与形成机制. 岩性油气藏, 25(2): 9~25.

乔秀夫,李海兵,苏德辰,何碧竹,田洪水,郭宪璞,宋天锐,吕洪波,高林志,贺静,袁效奇,周玮,张森,孙爱萍,王安东. 2017. 软沉积物变形构造—地震与古地震记录. 北京: 地质出版社, 1~264.

秦雁群,万仑坤,计智锋,李富恒,徐海龙,巴丹. 2018. 深水块体搬运沉积体系研究进展. 石油与天然气地质, 39(1): 140~152.

全晓园,刘池洋,张龙,张东东,王建强,马兔兔,冯琦,翟光麾. 2020. 华北板块南缘中段中上三叠统软沉积变形构造的发现及其地质意义. 现代地质, 34(2): 333~344.

邵珠福,钟建华,李勇,毛鑫,刘圣鑫,倪良田,田媛,刘云田,崔新穎,王晓楠,李伟华,林刚山. 2014. 青岛灵山岛纹层控制的砂级颗粒支撑叠瓦构造的发现及其意义. 中国科学: 地球科学, 44(8): 1761~1776.

宋明水,茆书巍,林会喜,郝雪峰,巩建强,张鹏飞,邱贻博,王园园. 2021. 断陷湖盆湖底扇砂岩体沉积特征及主控因素分析—以东营凹陷民丰地区沙三段中亚段为例. 油气地质与采收率, 28(3): 1~13.

苏德辰,孙爱萍,郑桂森,吕金波,郭荣涛. 2013. 北京西山寒武系滑塌构造的初步研究. 地质学报, 87(8): 1067~1075.

谈明轩,朱筱敏,耿名扬,刘常妮. 2016. 沉积物重力流流体转化沉积—混合事件层. 沉积学报, 34(6): 1108~1119.

王成,姜在兴,孔祥鑫,张元福,张建国,袁晓冬,刘晓宁. 2021. 滦平盆地西瓜园组中段厚层砾岩沉积特征及成因机制研究: 来自深页1井全井段连续取心的证据[J/OL]. [2022-03-28]. 地学前缘 <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.9.37>.

王龙樟,姚永坚,林卫兵,徐行,肖娇静,沈奥,徐乔. 2018. 南海南部沉积物波: 软变形及其触发机制. 地球科学, 43(10): 3462~3470.

王熙,王明镇. 2013. 安徽寿县新元古界球—枕状构造的双重成因与震脉动旋回研究. 地质学报, 87(6): 823~831.

许克民,朱学强,汪又平,宁振国,许莅菟阳,张志刚,彭楠,崔明明,旷红伟,柳永清. 2021. 灵山岛区域地质构造综述—多级褶皱构造研究和教学的天然实验室. 第十六届全国古地理学及沉积学学术会议论文摘要集, 81~82.

鄢继华,陈世悦,宋国奇,姜在兴,邱桂强. 2004. 三角洲前缘滑塌浊积岩形成过程初探. 沉积学报, 2004, 22(4): 573~578.

鄢继华,陈世悦,姜在兴,张关龙. 2007. 断陷湖盆震浊积岩成因模拟实验. 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.

杨田,操应长,田景春,牛小兵,李士祥,周新平,金杰华,张倚安. 2021a. 陆相湖盆深水重力流混合事件层沉积及沉积学意义. 地质学报, 95(12): 3842~3857.

杨田,操应长,田景春. 2021b. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识. 沉积学报, 39(1): 90~111.

袁效奇,苏德辰,贺静,孙爱萍,吕洪波,李海兵,乔秀夫. 2014. 鄂尔多斯南缘中奥陶统中的滑塌构造及其地震成因. 地质论评, 60(3): 529~540.

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, 2006, 24(1): 50~55.

赵激林,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, (04): 14~21.

钟建华. 2012. 灵山岛中生代沉积岩是深水源远浊积岩 还是陆内三角洲沉积? 与吕洪波教授商榷. 地质论评, 58(6): 1180~1182.

钟建华,宋冠先,倪良田,孙宁亮,郝兵,葛毓柱,薛纯琦,孙景耀,刘闯,曹梦春. 2019. 黄河下游与黄河三角洲现代非地震变形层理的研究. 沉积学报, 37(02): 239~253.

- 钟建华,倪良田,孙宁亮,郝兵,薛纯琦,邵珠福,毛毳,宋冠先,葛毓柱,陈彬,刘圣鑫,曹梦春,刘创,彭超峰,谷东辉,王超宁,王永强,李聪. 2020a. 青岛灵山岛下白垩统湖泊风暴沉积与风暴作用. *地质学报*, 94(10): 3036~3061.
- 钟建华,倪良田,汪立东,宋全友,孙宁亮,宋冠先,薛纯琦,郝兵,邵珠福,毛毳,刘闯,曹梦春. 2020b. 青岛灵山岛南背来石下白垩统大型砂脉的发现及其形成动力学研究. *地质论评*, 66(6): 1457~1475.
- 钟宁,蒋汉朝,梁莲姬,徐红艳,彭小平. 2017. 软沉积物变形中负载、球—枕构造的古地震研究综述. *地质论评*, 63(3): 719~738.
- 钟宁,蒋汉朝,李海兵,苏德辰,徐红艳,梁莲姬. 2021. 地震成因软沉积物变形记录的地震强度研究进展. *地质论评*, 67(6): 1785~1801.
- 周瑶琪,张振凯,梁文栋,李素,岳会雯. 2015a. 山东东部晚中生代构造—岩浆活动及原型盆地恢复. *地学前缘*, 22(1): 137~156.
- 周瑶琪,张振凯,许红,王安东,魏凯,张云翠,王子阳,李斗,陈阳子,刘扬,于珊珊,高晓军. 2015b. 灵山岛沉积物软变形构造特征. *海洋地质前沿*, 31(4): 42~54.
- 周瑶琪,周腾飞,张振凯,梁钊,梁文栋,王安东,于珊珊. 2017. 山东省灵山岛下白垩统青山群火山地震软沉积物变形构造特征及成因机制. *古地理学报*, 19(4): 567~582.
- 邹才能,赵政璋,杨华,付金华,朱如凯,袁选俊,王岚. 2009. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征—以鄂尔多斯盆地为例. *沉积学报*, 27(6): 1065~1073.
- Alsop G I, Marco S. 2011. Soft-sediment deformation within seismogenic slumps of the Dead Sea Basin. *Journal of Structural Geology*, 33(4): 433~457.
- Alsop G I, Marco S. 2012a. Tsunami and seiche-triggered deformation within offshore sediments. *Sedimentary Geology*, 261~262: 90~107.
- Alsop G I, Marco S. 2012b. A large-scale radial pattern of seismogenic slumping towards the Dead Sea Basin. *Journal of the Geological Society*, 169: 99~110.
- Alsop G I, Marco S. 2013. Seismogenic slump folds formed by gravity-driven tectonics down a negligible subaqueous slope. *Tectonophysics*, 605: 48~69.
- Alsop G I, Marco S, Weinberger R, Levi T. 2016. Sedimentary and structural controls on seismogenic slumping within mass transport deposits from the Dead Sea basin. *Sedimentary Geology*, 344: 71~90.
- Alsop G I, Marco S, Weinberger R, Levi T. 2017. Upslope-verging back thrusts developed during downslope-directed slumping of mass transport deposits. *Journal of Structural Geology*, 100: 45~61.
- Alsop G I, Weinberger R, Marco S, Levi T. 2019. Identifying soft-sediment deformation in rocks. *Journal of Structural Geology*, 125: 248~255.
- Alsop G I, Weinberger R, Marco S, Levi T. 2020a. Bed-parallel slip: Identifying missing displacement in mass transport deposits. *Journal of structural geology*, 131(4): 103952.
- Alsop G I, Weinberger R, Marco S, Levi T. 2020b. Detachment fold duplexes within gravity-driven fold and thrust systems. *Journal of Structural Geology*, 142: 104207.
- Alsop G I, Weinberger R, Marco S, Levi T. 2021. Criteria to discriminate between different models of thrust ramping in gravity-driven fold and thrust systems. *Journal of Structural Geology*, 150(B2): 104396.
- Altermann W. 1986. The Upper Paleozoic pebbly mudstone facies of peninsular Thailand and western Malaysia - continental margin deposits of Paleoeurasia. *Geologische Rundschau*, 75(2): 371~381.
- Bell F G. 2000. *Engineering properties of soils and rocks*, 4th ed. Blackwell, Oxford.
- Bryn P, Berg K, Forsberg C F, Solheim A. 2005. Explaining the Storegga Slide. *Marine and Petroleum Geology*, 22(1~2): 11~19.
- Bull S, Cartwright J, Huuse M. 2009. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 26(7): 1132~1151.
- Canals M, Lastras G, Urgeles R, Casamor J L, Mienert J, Cattaneo A, Batist M D, Hafidason H, Imbo Y, Laberg J S, Locat J, Long D, Longva O, Masson D G, Sultan N, Trincardi F, Bryn P. 2004. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data: case studies from the COSTA project. *Marine Geology*, 213(1~4): 9~72.
- Chen Guangpo, Li Juan, Wu Haibo, Peng Wei, Li Jingsheng, Xie Mingxian, Zhang Bin, Shi Xiaoqian. 2018. Sedimentary characteristics, identification mark and formation mechanism of the slumping deepwater gravity flow in fault lacustrine basin: a case study on the consecutive coring well of Ming D2 in Dongming sag, Hailaer Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(10): 1119~1129.
- Chen Jitao. 2020. Research progress of soft-sediment deformation structures. *Journal of Stratigraphy*, 44(1): 64~75.
- Chen Junfei, Zhang Changmin, Zhu Rui, Yang Bo, Yan Qi, Lu Xiaolin, Zhu Aiguo. 2017. Physical simulation and mechanism analysis of soft-sediment slump deformation. *Journal of Palaeogeography*, 19(1): 139~146.
- Coussot P, Meunier M. 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 1996, 40(3/4): 209~227.
- Cui Mingming, Peng Nan, Liu Yongqing, Wang Zongxiu, Li Chunlin, Xu Kemin, Kuang Hongwei. 2022. Recognizing deformation origins: a review of deformation structures and hypothesis on the perspective of sediment consolidation. *International Geology Review*, DOI: 10.1080/00206814.2022.2094840.
- Dasgupta P. 2008. Experimental decipherment of the soft-sediment deformation observed in the upper part of the Talchir Formation (Lower Permian), Jharia Basin, India. *Sedimentary Geology*, 205(3~4): 100~110.
- Deng Li, Yan Quanren, Song Bo, Gao Shanlin. 2021. Sedimentary responses to rifting of the Upper Yangtze Block (Sichuan basin area) in the Middle—Late Permian. *Acta Petrologica Sinica*, 37(8): 2465~2482.
- Dong Xiaopeng, Lü Hongbo, Zhang Xing, Zhang Haichun, Wang Jun, Chang Su-chin. 2014. Slump scarp outcrop found in Early Cretaceous flysch, North of Lingshan island, Qingdao, Shandong. *Geological Review*, 60(4): 771~779.
- Du Yuansheng, Yu Wenchao. 2017. Earthquake-caused and non-earthquake-caused soft-sediment deformations. *Geological Review*, 19(1): 65~72.
- Elliott C G, Williams P F. 1988. Sediment slump structures: a review of diagnostic criteria and application to an example from Newfoundland. *Journal of structural geology*, 10(2): 171~182.
- Fu Suotang, Deng Xiuqin, Pang Jinlian. 2010. Characteristics and mechanism of thick sandbody of Yanchang Formation at the centre of Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6): 1081~1089.
- Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Wei Qinlian, Chen Faliang, Chen Jun, Zhu Dengfeng, Liu Yun. 2012. Reviews on fluid properties and

- sedimentary characteristics of debris flows and turbidity currents. *Advances in Earth Scienc*, 27(8): 815~827.
- Ge Yuzhu, Zhong Jianhua. 2017&. Discussion about triggers of Early Cretaceous soft-sediment deformation structures on the Lingshan Island and the implications for palaeo-environment. *Geological Review*, 63(4): 927~940.
- He Weiling, Luo Shunshe, Li Yudong, Wu You, Lü Qiqi, Xi Mingli. 2020&. Spatio-temporal distribution of soft-sediment deformation structures on slope setting: a case study of Chang 7 oil reservoir in Zhenyuan area, Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 32(6): 62~72.
- Hiscott R N, Middleton G V. 1980. Fabric of coarse deep water sandstone Tourelle Formation, Quebec, Canada. *Journal of Sediment Petrology*, 50(3): 703~721.
- Jiang Hanchao, Zhong Ning, Li Yanhao, Xu Hongyan, Yang Huili, Peng Xiaoping. 2016. Soft sediment deformation structures in the Lixian lacustrine sediments, eastern Tibetan Plateau and implications for postglacial seismic activity. *Sedimentary Geology*, 344: 123~134.
- Kenney C. 1984. Properties and behaviours of soils relevant to slope stability. In: Brunsten, D., Prior, D. B. (Eds.), *Slope Instability*. Wiley, Chichester, pp. 27~65.
- Levi T, Weinberger R, Aifa T, Eyal Y, Marco S. 2006. Injection mechanism of clay-rich sediments into dikes during earthquakes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(12): Q12009.
- Levi T, Weinberger R, Eyal Y, Lyakhovsky V, Heifetz E. 2008. Velocities and driving pressures of clay-rich sediments injected into clastic dykes during earthquakes. *Geophysical Journal International*, 175(3): 1095~1107.
- Li Hua, He Mingwei, Qiu Chunguang, Wang Yingmin, He Youbin, Xu Yanxia, He Ruiwu. 2022&. Research processes on deep-water interaction between contour current and gravity flow deposits, 2000 to 2022 [J/OL]. [2022-03-28]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.027>.
- Li Shoujun, Zhang Xiangyu, Zhao Xiuli, Sun Zhixin, Zhang Daoyuan, Zhang Lei, Xu Lei, Wei Ning, Liu Baomei. 2017&. Discovery of fish and conchostracan fossils in Lower Cretaceous in Lingshan Island, Qingdao, Shandong. *Geological Review*, 63(1): 1~6.
- Li Shunli, Zhu Xiaomin, Li Shengli, Gong Chenglin, Pan Rong, Chen Hehe. 2020. Trigger mechanisms of gravity flow deposits in the Lower Cretaceous lacustrine rift basin of Lingshan Island, Eastern China. *Cretaceous Research*, 107: 104269.
- Li Xiangbo, Liu Huaqing, Wan Yanrong, Wei Lihua, Liao Jianbo, Ma Yuhu. 2009&. First discovery of the sandy debris flow from the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Lithologic Reservoirs*, 21(4): 19~21.
- Li Xiangbo, Liu Huaqing, Pan Shuxin, Wang Jing. 2019&. The past, present and future of research on deep-water sedimentary gravity flow in lake basins of China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(5): 904~921.
- Li Yong, Zhong Jianhua, Shao Zhufu, Mao Cui. 2012&. An overview on the classification and genesis of soft-sediment deformation structure. *Geological Review*, 58(5): 829~838.
- Liang Zhao, Zhou Yaoqi, Van Loon A J. 2018. Soft-sediment deformation structures induced by rapid sedimentation in Early Cretaceous turbidites, Lingshan Island, eastern China. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55(2): 118~129.
- Liu Bingqiang, Shao Longyi, Wang Weichao, Huang Xianhao, Liu Wenjin, Zhang Shaolin, Zhang Hao, Lu Jing. 2020&. Sedimentary characteristics and depositional model of deep-water deposits dominated by gravity flow: A case study from the Lower Triassic in the Gonghe Basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(4): 1106~1127.
- Liu Han. 2018&. Physical modeling of kinematics and internal deformation within slumping structures. Supervisor: Liu Zhina. Beijing: Master dissertation of China university of Petroleum (Beijing): 1~56.
- Liu Jianping, Xian Benzong, Zhang Li, Su Ming, Li Yuzhi, Yan Haiqing, Wang Zhen, Chen Peng. 2022&. Depositional process and model of debrite dominated deep-water system in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin. [J/OL]. [2022-03-28]. *Geology in China*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210302.1616.005.html>.
- Liu Zhina, Koyi H A, Swantesson J O H, Nilfouroushan F, Reshetuk Y. 2013. Kinematics and 3-D internal deformation of granular slopes: analogue models and natural landslides. *Journal of Structural Geology*, 160: 21~33.
- Liu Zhina, Koyi H A. 2014. Analogue modeling of the collapse of non-homogeneous granular slopes along weak horizons. *Tectonophysics*, 632: 76~95.
- Lowe D R. 1982. Sediment—gravity flows, II: Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52: 279~297.
- Lü Hongbo, Zhang Yuxu, Xiao Guowang, Zhang Qiling. 2006a&. Earthquake slump blocks discovered in Lower part of the Sailinudong group, Heinaobao, southeast Bayan Obo, Inner Mongolia. *Geological Review*, 52(2): 163~169.
- Lü Hongbo, Zhang Yuxu, Zhang Qiling, Xiao Jiafei. 2006b. Earthquake related tectonic deformation of soft-sediment sand: its constraints on basin tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 80: 724~732.
- Lü Hongbo, Wang Jun, Zhang Haichun. 2011&. Discovery of the Late Mesozoic slump beds in Lingshan Island, Shandong, and a pilot research on the regional tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 938~946.
- Lü Hongbo, Zhang Yuxu, Zhang Haichun, Feng Xuedong, Qin Beibei, Chen Kangli, Zheng Daran, Li Sha, Zhang Qi, Dong Xiaopeng, Tang Ke, Zhu Guifan. 2016&. An Introduction to a Natural Outcrop of an Early Cretaceous Lacustrine Delta in Celaomiao Depression, Urad Rear Banner, Inner Mongolia—One of the Typical Outcrops in Celaomiao Depression for Earth Science Research and Field Training. *Geological Review*, 62(1): 229~234.
- Maltman A J. 1981. Primary bedding-parallel fabrics in structural geology. *Journal of Structural Geology*, 138(4): 475~483.
- Marques F O, Guerreiro S M, Fernandes A R. 2008. Sheath fold development with viscosity contrast: analogue experiments in bulk simple shear. *Journal of Structural Geology*, 30: 1348~1353.
- Marques F O, Fonseca P D, Lechmann S, Burg J P, Marques A S, Andrade A J M, Alves C. 2012. Boudinage in nature and experiment. *Tectonophysics*, 526~529: 88~96.
- Meng Yuanku, Li Rihui. 2019&. Early Cretaceous tectonic evolution on Lingshan Island, Qingdao, and adjacent regions. *Geological Review*, 65(2): 385~388.
- Middleton G V, Hampton M A. 1976. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows//Stanley D J, Swift D J P. *Marine Sediment Transport and Environmental Management*, Wiley, New York: 197~218.

- Moretti M, Alfaro P, Caselles O, Canas J A. 1999. Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics*, 304: 369~383.
- Moscardelli L, Wood L. 2008. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad. *Basin Research*, 20 (1): 73~98.
- Moore J C, Geigle J E. 1974. Slaty cleavage: incipient occurrences in the deep sea. *Science*, 183: 509~510.
- Mulder T, Cochonat P. 1996. Classification of offshore mass movements. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 43~57.
- 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, Moretti M. 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. *Sedimentary Geology*, 235: 141~147.
- Pan Shuxin, Zheng Rongcai, Wei Pingsheng, Wang Tianqi, Chen Bintao, Liang Sujuan. 2013&. Deposition characteristics, recognition mark and form mechanism of mass transport deposits in terrestrial lake basin. *Lithologic Reservoirs*, 25(2): 9~25.
- Posamentier H W, Martinsen O J. 2011. The character and genesis of submarine mass-transport deposits: Insights from outcrop and 3D seismic data. *SEPM Special Publication* 96: 7~38.
- Qiao Xiufu, Li Haibing, Su Dechen, He Bizhu, Tian Hongshui, Guo Xianpu, Song Tianrui, Lü Hongbo, Gao Linzhi, He Jing, Yuan Xiaoqi, Zhou Wei, Zhang Miao, Sun Aiping, Wang Andong. 2017#. Soft-sediment deformation structures——earthquakes and seismic records; Beijing, Geological Publishing House.
- Qin Yanqun, Wan Lunkun, Ji Zhifeng, Li Fuheng, Xu Hailong, Ba Dan. 2018&. Progress of research on deep-water mass-transport deposits. *Oil and Gas Geology*, 39(1): 140~152.
- Quan Xiaoyuan, Liu Chiyang, Zhang Long, Zhang Dongdong, Wang Jianqiang, Ma Huanhuan, Feng Qi, Zhai Guanghui. 2020&. Discovery of the soft-sediment deformation structure in the Middle—Upper Triassic sequence of the middle segment of southern North China plate margin and its geological significance. *Geoscience*, 34 (2): 333~344.
- Ramsay J G. 1967. *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, New York.
- Rodriguez-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(1): 117~135.
- Rodriguez-Pascua M A, Silva P G, Perucha M A, Giner-Robles J L, Heras C, Bastida A B, Carrasco P, Roquero E, Lario J, Bardaji T, Pérez-López R, Elez J. 2016. Seismically induced liquefaction structures in La Magdalena archaeological site, the 4th century AD Roman Complutum (Madrid, Spain). *Sedimentary Geology*, 344: 34~46.
- Shanmugam G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s ~ 1990s): Deep-water processes and facies models — a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 285~342.
- Shanmugam G. 2011. Transport mechanisms of sand in deep-marine environments——insights based on laboratory experiments: discussion. *Journal of Sedimentary Research*, 81(11): 842~843.
- Shanmugam G. 2013. New perspectives on deep-water sandstones: Implications. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 316~324.
- Shao Zhufu, Zhong Jianhua, Li Yong, Mao Cui, Liu Shengxin, Ni Liangtian, Tian Yuan, Liu Yuntian, Cui Xinying, Wang Xiaonan, Li Weihua, Lin Gangshan. 2014&. Characteristics and sedimentary processes of lamina-controlled sand-particle imbricate structure in deposits on Lingshan Island, Qingdao, China. *Science China: Earth Sciences*, 57(4): 1061~1076.
- Song Mingshui, Mao Shuwei, Lin Huixi, Hao Xuefeng, Gong Jianqiang, Zhang Pengfei, Qiu Yibo, Wang Yuanyuan. 2021&. Sedimentary characteristics and controlling factors of sublacustrine fan sand bodies in faulted basin: A case study of Middle Es<sub>3</sub> in Minfeng area, Dongying Sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 28(3): 1~13.
- Su Dechen, Sun Aiping, Zheng Guisen, Lü Jinbo, Guo Rongtao. 2013&. A preliminary research on the slump structures in Cambrian system in the western hills of Beijing. *Acta Geologica Sinica*, 87 (8): 1067~1075.
- Tan Mingxuan, Zhu Xiaomin, Geng Mingyang, Liu Changni. 2016&. The flow transforming deposits of sedimentary gravity flow-hybrid event bed. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(6): 1108~1119.
- Van Loon A J. 2002. Soft-sediment deformations in the Kleszczów Graben (central Poland). *Sedimentary Geology*, 147: 57~70.
- Waldron J W F, Gagnon J F. 2011. Recognizing soft-sediment structures in deformed rocks of orogens. *Journal of structural geology*, 33(3): 271~279.
- Wang Cheng, Jiang Zaixing, Kong Xiangxin, Zhang Yuanfu, Zhang Jianguo, Yuan Xiaodong, Liu Xiaoning. 2021&. Sedimentary characteristic and genesis of thick conglomerate in the middle section of the Xiguayuan Formation in Luanping Basin: a case study from the consecutive coring well of LY1 [J/OL]. [2022-03-28]. *Earth Science Frontiers*, <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2021.9.37>.
- Wang Longzhang, Yao Yongjian, Lin Weibing, Xu Xing, Xiao Jiaojing, Shen Ao, Xu Qiao. 2018&. Sediment waves in the south of south China Sea: soft sediment deformation and its triggering mechanism. *Earth Science*, 43(10): 3462~3470.
- Wang Xi, Wang Mingzhen. 2013&. The discovery and geological preliminary investigation of a slump-slip soft-sediment deformation multilayer complex structure in Neoproterozoic strata in Shouxian county, Anhui province. *Acta Geologica Sinica*, 87(6): 823~831.
- Yan Jihua, Chen Shiyue, Song Guoqi, Jiang Zaixing, Qiu Guiqiang. 2004&. Preliminary study on the formation of fluxoturbidite in front of delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 573~578.
- Yan Jihua, Chen Shiyue, Jiang Zaixing, Zhang Guanlong. 2007&. Simulating experiment on genesis of seismo-turbidites in rift lacustrine basin. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 277~282.
- Yan Jihua, Cui Yongbei, Chen Shiyue. 2009&. Identification of common facies indicators of seismites in simulated experiments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1131~1137.
- Yang Renchao, Van Loon A J. 2016. Early Cretaceous slumps and turbidites with peculiar soft-sediment deformation structures on Lingshan Island (Qingdao, China) indicating a tensional tectonic regime. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129: 206~219.
- Yang Tian, Cao Yingchang, Friis H, Liu Keyu, Wang Yanzhong. 2018. Origin and evolution processes of hybrid event beds in the Lower Cretaceous of the Lingshan Island, Eastern China. *Australian Journal of Earth Sciences*, 65(4): 517~534.
- Yang Tian, Cao Yingchang, Tian Jingchun, Niu Xiaobing, Li Shixiang, Zhou Xinping, Jin Jiehua, Zhang Yi'an. 2021a&. Deposition of

deep-water gravity-flow hybrid event beds in lacustrine basins and their sedimentological significance. *Acta Geologica Sinica*, 95(12): 3842~3857.

Yang Tian, Cao Yingchang, Tian Jingchun. 2021b&. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in lacustrine basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 90~111.

Yuan Xiaoqi, Su Dechen, He Jing, Sun Aiping, Lü Hongbo, Li Haibing, Qiao Xiufu. 2014&. The slump structures in the Middle Ordovician on the southern margin of Ordos basin and their seismic origin. *Geological Review*, 60(3):529~540.

Zhang Guanlong, Chen Shiyue, Yan Jihua, Jiang Zaixing, Song Guoqi, Qiu Guiqiang. 2006&. Simulation of fluxoturbidite in front of delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(1): 50~55.

Zhao Chenglin, Liu Menghui. 1988&. Contemporaneous deformed structures in lacustrine sedimentary rocks and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, (04):14~21.

Zhong JianHua, Song Guanxian, Ni Liangtian, Sun Ningliang, Hao Bing, Ge Yuzhu, Xue Chunqi, Sun Jingyao, Liu Chuang, Cao Mengchun. 2019&. Modern non-seismically induced deformation bedding in the lower reaches of the Yellow river and Yellow river delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(02): 239~253.

Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Sun Ningliang, Hao Bing, Xue Chunqi, Shao Zhufu, Mao Cui, Song Guanxian, Ge Yuzhu, Chen Bin, Liu Shengxin, Cao Mongchun, Liu Chuan, Peng Chaofeng, Gu Donghui, Wang Chaoning, Wang Yongqiang, Li Cong. 2020a&. Lacustrine storm and tempestite of Lower Cretaceous in the Lingshan island, Qingdao, Shandong. *Acta Geologica Sinica*, 94(10): 3036~3061.

Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Wang Lidong, Song Quanyou, Sun Ningliang, Song Guanxian, Xue Chunqi, Hao Bing, Shao Zhufu, Mao Cui, Liu Chuang, Cao Mengchun. 2020b&. Discovery of large sand dykes in the Lower Cretaceous of southern Beilaishi, Lingshan Island, Qingdao, and their formation dynamics. *Geological Review*, 66(6):1457~1475.

Zhong Ning, Jiang Hanchao, Liang Lianji, Xu Hongyan, Peng Xiaoping. 2017&. Paleoearthquake researches via soft sediment deformation of load, ball and pillow structure: A Review. *Geological Review*, 63(3):719~738.

Zhong Ning, Jiang Hanchao, Li Haibing, Su Dechen, Xu Hongyan, Liang Lianji. 2021&. The use of soft-sediment deformation structures as proxies for paleoseismic activity and shaking: A review. *Geological Review*, 67(6):1785~1801.

Zhou Yaoqi, Zhang Zhenkai, Liang Wendong, Li Su, Yue Huiwen. 2015a &. Late Mesozoic tectono-magmatic activities and prototype basin restoration in Eastern Shandong Province, China. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 137~156.

Zhou Yaoqi, Zhan Zhenkai, Xu Hong, Wang Andong, Wei Kai, Zhang Yuncui, Wang Ziyang, Li Dou, Chen Yangzi, Liu Yang, Yu Shanshan, Gao Xiaojun. 2015b&. Soft-sediment deformation structures in the sediments at Lingshan island. *Marine Geology Frontiers*. 31(4): 42~54.

Zhou Yaoqi, Zhou Tengfei, Zhang Zhenkai, Liang Zhao, Liang Wendong, Wang Andong, Yu Shanshan. 2017&. Characteristics and formation mechanism of soft sediment deformation structures related to volcanic earthquakes of the Lower Cretaceous Qingshan Group in Lingshan Island, Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 19(4): 567~582.

Zou Caineng, Zhao Zhengzhang, Yang Hua, Fu Jinhua, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, WangLan. 2009&. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1065~1073.

Zulauf J, Zulauf G, Hammer J, Zanella F. 2011. Tablet boudinage of an anhydrite layer in rock—salt matrix: results from thermomechanical experiments. *Journal of Structural Geology*, 33: 1801~1815.

Research progress on deformation structures of slump deposits in continental lacustrine basin

CUI Mingming<sup>1)</sup>, PENG Nan<sup>1)</sup>, LIU Yongqing<sup>1)</sup>, WANG Zongxiu<sup>2)</sup>, KUANG Hongwei<sup>1)</sup>, Xu Kemin<sup>3)</sup>, LI Chunlin<sup>2)</sup>

- 1) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;
- 2) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;
- 3) Shandong Institute of Geological Survey, Jinan, 250014

**Objectives:** The complex syn-sedimentary deformation structures induced by slump deposits in continental lacustrine basins are essential when interpreting paleotopography and ancient earthquakes. A systematic study on the slump deformation system is conducive to the identification of deformation origin, understanding of deformation mechanism and deeply interpretation of regional tectonic background.

**Methods:** Based on a literature review, we summarize the forming conditions and deformation characteristics of slump deposits along the slope, especially the morphological evolution of slump folds, the associated deformation structures, indication of the ancient slope and physical simulation.

**Results:** Comprehensive analysis shows that: (1) slump deformation in continental lacustrine basin is closely related to gravity flow deposition; (2) cylindrical fold and tight upright fold are at head of single slump body while mushroom-shaped fold at toe, the morphology evolution of these folds can be divided into several stages; (3) thrust

faults, elastic dykes, irregular erosion surfaces and soft boudinage can be seen in slump folds; (4) stress mechanism and liquefaction mechanism are the two main mechanism of slump deformation; (5) physical simulation may become an important aspect of slump deformation study due to its changeable parameters of materials.

**Conclusions:** Disputes still exist in the identification of deformation origin. Sediment reworking, remobilization, bioturbation and liquefaction of unconsolidated sediments are the key indicators of soft-sediment deformation.

**Keywords:** slump deformation structures; soft-sediment deformation structures; internal fold; tectonic deformation

**Acknowledgements:** This work was supported by the Program of National Natural Science Foundation of China (No. 42288201, 41688103 and 41672111), the Program of China Geological Survey (No. DD20221649 and DD20190005), and the Balance Project of Institute of Geology, CAGS (No. S2008). The authors are grateful to GAO Wanli and LI Leilei from Institute of Geomechanics CAGS for discussion in completing this manuscript. We thank YANG Zhenrui for his help in the field. We also thank the reviewers for helpful comments that improved our paper

**First author:** CUI Mingming, male, born in 1989, Ph. D., mainly engaged in sedimentary geology; Email: cuiskd1988@163.com

**Corresponding author:** PENG Nan, male, born in 1983, Ph. D., research assistant, mainly engaged in sedimentary geology and paleogeography; Email: pengnan19830120@126.com

**Manuscript** received on: 2022-02-13; Accepted on: 2022-08-11; Network published on: 2022-08-20  
**Doi:** 10.16509/j.georeview.2022.08.035 **Edited by:** ZHANG Yuxu

