

# 沉积作用下海底滑坡失稳触发机制的研究

刘洋

同济大学土木工程学院

DOI:10.12238/gmsm.v7i2.1652

**[摘要]** 海底滑坡位于深海复杂动力环境中,其触发机制较陆域滑坡复杂许多,其中沉积作用作为主要触发机制之一,研究进展及成果却没有地震、波浪、天然气水合物分解等其他因素丰富。因此,本文首先通过总结海底滑坡失稳诱发因素引出了沉积作用较于其他触发因素的特殊之处,进而基于其作为海底滑坡最基本触发因素的认识,梳理概括了在其本身特征和其他因素影响下导致海底滑坡产生的三类沉积作用,最后对三类沉积作用的海底滑坡触发机制及最新研究成果进行探讨与回顾,指出目前研究存在的不足和未来发展方向,以期为揭示沉积作用下海底滑坡失稳触发机制提供重要参考。

**[关键词]** 沉积作用; 海底滑坡; 触发机制; 高沉积速率; 等深流沉积

**中图分类号:** TV139.2+32 **文献标识码:** A

## The Triggering Mechanism of Submarine Landslide Instability under Sedimentation

Yang Liu

College of Civil Engineering, Tongji University

**[Abstract]** Submarine landslides occur in the complex and dynamic environment of the deep sea, and their triggering mechanism is more intricate compared to that of terrestrial landslides. Sedimentation, as one of the primary triggering mechanisms, has received less attention in research progress and results when compared to other factors such as earthquakes, waves, and decomposition of natural gas hydrates. Therefore, this paper initially summarizes the destabilizing factors associated with submarine landslides to highlight the unique characteristics of sedimentation in comparison to other triggers. Subsequently, based on recognizing sedimentation as the fundamental triggering factor for submarine landslides, this study categorizes three types of sedimentation that lead to submarine landslides considering their own characteristics and interactions with other factors. Finally, it discusses the triggering mechanism and latest research findings related to these three types of sedimentation-induced submarine landslides while also addressing current research limitations. The discussion concludes by highlighting deficiencies in existing studies along with future development directions aimed at providing valuable insights into understanding the destabilization mechanism of submarine landslides under sedimentation.

**[Key words]** sedimentation; submarine landslide; triggering mechanism; high sedimentation rate; contour sedimentation

### 引言

海底滑坡的孕灾及发生过程是能量的聚集与消散过程,由于其在深海水动力环境中,触发、运移、致灾等过程相较于陆域滑坡等灾害更复杂。从沉积学角度上讲,海底滑坡被称为现今海底已形成或正在形成的块体搬运沉积(MTD),是将陆坡陆架沉积物运移至深海盆地的最常见沉积作用之一,在全球“源到汇”研究中占重要地位。海底滑坡在块体搬运过程中受地形地貌环境影响容易分解形成大规模碎屑流或浊流,受地震等外界因素干扰下,一旦发生可能会带来一系列链式灾害效应。因此,对海

底滑坡进行全方位多尺度致灾机制及灾变演化过程研究,建立海底滑坡预测预警平台,从而保证深海工程建设及人民生命已迫在眉睫。

海底滑坡触发机制的研究作为热点问题,直接关系到其稳定性评价和预测的准确性。目前公认的海底滑坡触发机制被分为了内因与外因两大作用,发生失稳需要同时满足内外因两大条件。内因包括海底地形条件、海底软弱层、沉积物的物理力学性质等;外因则包含火山喷发、地震活动、沉积作用、波浪作用、底辟作用、天然气水合物分解等。然而,国内外关于海底

滑坡的触发机制研究主要集中在水动力触发机制、地震以及天然气水合物分解引起海底滑坡等方面,沉积作用虽单独被列为海底滑坡成因的重要因素之一,直接探究其触发海底滑坡的相关研究却较少。

因此,为更深入了解沉积作用对海底滑坡稳定性的影响,本文梳理并总结了沉积作用作为海底滑坡最基础触发因素的三类定性机制,以期为更深刻认识海底滑坡触发本质及特征提供帮助。

### 1 海底滑坡失稳诱发因素及机制研究概况

由于内外部因素众多,且两者存在潜在联系,并非完全割裂开,因此不同学者所采用的分类方式不尽相同。Locat等采用与陆域滑坡形成机制相似的思路,将8种海底滑坡诱发因素分为增大下滑力和降低抗滑力两类,并认为波浪和沉积作用较为重要;Masson等梳理了可能造成海底滑坡的9种因素,除自然因素外增加了人类活动干扰,并强调许多海底滑坡是由多种因素叠加造成的;Urgeles等根据增大或降低剪切强度将引发海底滑坡破坏的因素细化为15种,认为地震与沉积作用是最主要的边坡不稳定驱动因素。

由上述文献综述可知,海底滑坡失稳诱发因素不断被细化重分,其中地震、波浪、天然气水合物分解等作为海底滑坡的外力触发因素已被广泛认可与研究,但沉积作用在海底滑坡触发机制的分类研究中一直没有统一的定论。一方面海底滑坡本身便是将沉积物从陆架坡搬运向深海盆地的最重要的沉积作用过程之一,可直接看作触发海底滑坡影响因素中的外部因素;另一方面在长期的沉积过程中,沉积作用影响沉积物物理力学性质,如快速沉积导致沉积物来不及固结等,该角度下,沉积作用又作为内部因素影响海底滑坡的触发。因此,一些学者将沉积作用归为内因,又叫做前置或前条件因素,一些则将其与地震、冰川作用等一同归为外部触发因素。

本文认为造成上述沉积作用在内外因分类上模糊的本质原因在于沉积作用是导致海底滑坡触发的最基本因素,其他任何触发因素都是通过影响沉积作用进而触发海底滑坡的。沉积作用作为海洋环境中持续不断的动力作用,对海底地貌、沉积序列产生的影响需从大跨度地质历史的角度考虑,不仅包含现代沉积信息,还包括大量的古海洋、古构造演化甚至古气候信息等。因此,沉积作用在触发海底滑坡之前便经历了长周期的地质孕育过程,为海底滑坡发生提供了基本物质特征,同时,其在触发海底滑坡时又容易受到其他海底滑坡触发因素的影响,如在水动力能量低的地方沉积过程缓慢、均变,反之在水动力能量高时沉积速率较快等。沉积作用的特殊之处使得单独考虑沉积作用触发海底滑坡本身并不合理,试验和数值模拟往往很难还原长周期的复杂沉积作用,对其的研究应该结合古沉积学、地质学、地球物理学等多学科全面展开。

### 2 沉积作用触发海底滑坡失稳机制及现状分析

#### 2.1 高速率-未固结沉积

沉积物的快速沉积使得沉积层迅速变厚的同时来不及排水固结,未能排出的水在沉积层中形成超压,流体超压使得流过的

沉积层内抗剪强度变低,上部斜坡很容易沿流体层发生滑动,或导致海床向流体层塌陷、冲沟,最终形成海底滑坡。超压随海底斜坡深度增大而升高,早期文献多认为只有在较深的斜坡内部才会遇到超压,Flemings等,则发现在海底以下200m处就有严重超压,因此,只要在快速沉积的低渗透海底沉积层条件下,高速率-未固结沉积触发海底滑坡极为常见。目前在广义上学者们所说的沉积作用触发海底滑坡机制指的便是高速率-未固结沉积,其他外部触发因素如地震、构造活动、冰川融化、海平面下降等触发海底滑坡时,往往最终也会归于极端沉积速率。

在关于高速率-未固结沉积的研究中,沉积物固结模型的建立、快速沉积对超压的发展影响是学者们的主要关注内容。Gibson在假定土壤性质恒定的基础上首次提出了薄粘性土一维固结的解析解,然而沉积物在不断沉积中物理力学性质并不会一成不变,因此该假设较为极端,但却为后续许多学者在此基础上建立更复杂完善的沉积模型、判断模型精确度做出了极大贡献。迄今为止,已经有许多模拟沉积物沉积与沉积层厚度、超压及斜坡角度等关系的模型,有些已被应用于实际且与实际吻合度较高,有些虽存在争议或应用率低,但均为快速沉积建模方面的研究提供了新的思路与尝试。不同假定、不同条件及不同材料下的沉积模型各不相同,但大多都采用有限差分法进行求解且采用同种本构关系建立的模型在改变参数条件下能够互通。目前已有的物理数值模型均太过理想化,很难应用到实际中,但模型建立逐渐从一维向多维、单一材料向非均质复杂材料、单场因素向多场耦合、平地斜坡等复杂化、更符合实际的方向发展。此外,由于原位观测技术的不断进步,目前对超压的观测与测量能力逐渐提高,这也使得我们在理解高速沉积对超压的作用机制上有了很大进展。

#### 2.2 等深流沉积

在以往多数研究中学者们认为海底滑坡由重力流作用而形成。而等深流概念虽早在1936年就被德国海洋物理学家Wüst提出,但限于深海环境数据难以获取而发展缓慢。随着近年来地球物理技术、海洋勘探及岩芯资料的不断完善以及深海油气资源开发的需求,对等深流研究不断深入,大量由等深流造成的海底滑坡被发现。实际上,等深流的侵蚀和沉积以及对深水地貌的改变在很多情况下不亚于重力(流)机制,Elger等表明在进行海底滑坡危险评估时必须考虑天然气水合物系统相关的等深流过程。

目前有许多学者尝试揭示等深流沉积触发海底滑坡的机制与特征,如Bryn等对Storegga滑坡进行了较为全面的研究,认为等深流形成的漂积体运移后产生的陡崖与滑坡启动具有密切联系;Krastel等认为由等深流产生的海底滑坡规模较重力流较小,但数量更丰富;Wang等表明强烈的等深流会侵蚀海底斜坡而增加海底滑坡的可能性,且多数等深流海底滑坡发生在沉积速率较高的地区。综上所述,相关研究多集中在根据地球物理技术和原位海底观测建立现象之间的可能关系、进行定性分析等,等深流沉积从侵蚀海底斜坡、产生陡崖、增加沉积物输入等方面增加了海底滑坡的触发可能,详细触发机制仍有待大量研究。

尽管等深流触发海底滑坡的具体原因尚无定论,但等深流能够改造重力流沉积已被大量学者证实,且在近几年两种沉积作用的交互作用逐渐成为了研究热点,这方面的研究将对揭示等深流海底滑坡触发机制起到重要的作用。由于两类沉积作用的特征及学者们的研究方案与思路的多样性,目前对交互沉积作用的分类纷繁多样、并未统一,其中Mulder的分类方法由于简单、全面受到了其他学者的认同,他将交互作用划分为等深流与浊流沉积互层、等深流与浊流同时作用沉积及等深流改造浊流沉积三类。考虑到大量海底滑坡依然是重力流作用产物,厘清等深流与重力流的交互作用形成机理,对揭示沉积作用触发海底滑坡具有重要意义,关于该方向的研究目前仍集中在定性描述性分析,试验与数值模拟较少,在今后的发展中要关注定量分析,在阐明两种沉积作用交互机制的基础上进行海底滑坡等地质灾害的评估及预测研究。

### 2.3 特殊沉积物沉积

在海底滑坡产生内因中包含沉积物物理力学性质、是否有软弱层等潜在滑坡地质条件,这些沉积物特性需要从长周期地质历史的角度去考虑,且在海底滑坡触发中占据关键地位。Urlaub等人研究了在沉积速率低于 $0.15\text{ m/kyr}$ 时造成的海底滑坡,结果表明沉积速率较低时很难产生超压,造成斜坡失稳的原因是沉积时有机物含量丰富而易造成软弱层,这也解释了为什么在坡度极缓的条件下也可以触发海底滑坡。不同地区、不同沉积物类型在长期沉积作用孕育下均可能导致不同的海底滑坡触发机制,这类触发机制虽不具有普遍性,但却能够很好地解释非常规海底滑坡的出现。

## 3 结论

本文以沉积作用触发海底滑坡为研究主线,从海底滑坡失稳诱发因素分类出发分析了沉积作用在众多诱发因素中的特殊之处,根据已有研究及现象归纳总结出目前的沉积作用海底滑坡触发机制及研究现状,得出如下结论与建议:

(1) 沉积作用是诱发海底滑坡的最基本因素,为斜坡失稳提供基本物质条件,其内外因兼具,试验与数值模拟很难还原长周期的沉积过程,在研究其触发海底滑坡时需从地质历史的角度出发,结合古沉积学、地质学、地球物理学等多学科全面展开。

(2) 目前导致海底滑坡触发的沉积作用可归纳为高速率-未固结沉积、等深流沉积、特殊沉积物沉积三类,其中高速率-未固结沉积和特殊沉积物沉积导致的海底滑坡机制较为明晰,等深流沉积触发海底滑坡仅停留在假设与定性分析层面,将是未来的重点研究方向。

(3) 在原位与地球物理技术不断进步的时代,不断创建更复杂化的沉积模型并非我们的研究目的,采用合理简化的模型抓住主控因素揭示超压本质形成机制,并能够在实际工程中大规模应用才应是需要考虑的问题;同时,回顾并梳理以往各类模型

的规律与异同点,也是一项必要的工作。

(4) 等深流能够造成海底滑坡已被证实,但具体的触发机制尚不明晰,其研究成果在近年随着科学技术的进步而逐渐丰富起来,尤其是与重力流的交互作用方面。考虑到大量海底滑坡依然是重力流作用产物,厘清等深流与重力流的交互作用形成机理,对揭示沉积作用触发海底滑坡具有重要意义。关于该方向的研究目前仍集中在定性描述性分析,试验与数值模拟较少,在今后的发展中要关注定量分析,在阐明两种沉积作用交互机制的基础上进行海底滑坡等地质灾害的评估及预测研究。

### 【参考文献】

- [1]朱筱敏,李顺利,潘荣,等.董艳蓄沉积学研究热点与进展:第32届国际沉积学会议综述[J].古地理学报,2016,(18):699-716.
- [2]朱超祁,贾永刚,刘晓磊,等.单粒海底滑坡分类及成因机制研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2015,(35):153-163.
- [3]年廷凯,沈月强,郑德凤.雷得洛海底滑坡链式灾害研究进展[J].工程地质学报,2021,(29):1657-1675.
- [4]唐常锐,徐秀刚,孙秉才.姜瑞景天然气水合物分解诱发海底滑坡影响因素分析及致灾风险评价[J].海洋地质前沿,2021,(37):14-21.
- [5]Locat,J.;Lee,H.J.Submarine Landslides:Advances and Challenges.Can.Geotech.J.2002,39,193-212.
- [6]Masson,D.G.;Harbitz,C.B.;Wynn,R.B.;Pedersen,G.;Lovholt,F.Submarine Landslides:Processes,Triggers and Hazard Prediction.Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci. 2006, 364, 2009-2039.
- [7]Urgeles, R.;Camerlenghi, A. Submarine Landslides of the Mediterranean Sea:Trigger Mechanisms, Dynamics, and Frequency-Magnitude Distribution. J. Geophys. Res.-Earth Surf. 2013,118,2600-2618.
- [8]Canals,M.;Lastras, G.; Urgeles, R.; Casamor, J.L.; Mienert, J.; Cattaneo, A.; De Batist, M.; Hafliadason, H.; Imbo, Y.; Laberg, J.S.; et al. Slope Failure Dynamics and Impacts from Seafloor and Shallow Sub-Seafloor Geophysical Data: Case Studies from the COSTA Project.Mar.Geol.2004,213,9-72.
- [9]Lee,H.J.Timing of Occurrence of Large Submarine Landslides on the Atlantic Ocean Margin. Mar. Geol.2009,264,53-64.
- [10]李华,何明薇,邱春光,等.深水等深流与重力流交互作用沉积(2000-2022年)研究进展[J].沉积学报,2023,(41):18-36.

### 作者简介:

刘洋(1998-),女,汉族,山西省忻州市原平市人,本科,硕士在读,研究方向:地质资源与地质工程。