

司少文,王大伟,贺惠忠,等.海底失稳调查与评价流程[J].海洋地质前沿,2021,37(2):21-30.

# 海底失稳调查与评价流程

司少文<sup>1,2,3</sup>,王大伟<sup>2\*</sup>,贺惠忠<sup>4</sup>,孙悦<sup>2,3</sup>,孙金<sup>2</sup>,吴时国<sup>2</sup>

(1 中国科学院海洋研究所,青岛 266071;2 中国科学院深海科学与工程研究所,海南三亚 572000;

3 中国科学院大学,北京 100049;4 国家海洋局南海调查技术中心,广州 510310)

**摘要:**不同于陆地滑坡,海底滑坡由于水动力条件这一特殊因素致使其难以观测,其致灾机理、失稳评价流程等也未形成标准。对海底失稳与致灾机理的深入研究,涉及海斗深渊的形成与演化、深水工程开发的商业利益、海洋地质灾害的预测及海洋工程的安全等诸多问题。海底失稳调查与评价流程分为地质调查、灾害机理分析、失稳评价 3 个方面,综合地球物理、海底原位监测、数值模拟、物理实验模拟等技术方法,形成从前期调查到后期评估的完整流程,对海底稳定性评价工作具有参考意义。

**关键词:**海底失稳;海洋工程地质调查;海底稳定性评价;海底滑坡

中图分类号:P736.21;P694

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2020.008

## 0 引言

在世界范围内的大陆边缘,经常发生规模不等的海底失稳事件,形成海底滑坡,也被称为块体搬运沉积体/块体流沉积(Mass-Transport Despoits)。近年来,随着人类对于深海环境资源的不断探索和研究,海底失稳事件也逐渐受到海洋地质学家的关注。例如,位于挪威大陆边缘的 Storegga 滑坡体是迄今发现的最大的海底滑坡体之一,也是多年以来海底失稳的研究热点,对海底滑坡体的触发及形成机制、与其相关的海啸以及与环境气候变化之间的关联都有了进一步的了解和认识,为世界范围内的其他海底失稳研究提供了重要的参考<sup>[1]</sup>。

当今海底测绘、取样和监测技术取得了巨大进展。对海底失稳与致灾机理的深入研究,涉及了海

斗深渊形成与演化的科学问题、深水工程开发的商业利益、海洋地质灾害的预测及海洋工程的安全。在水深 500~2 500 m 的深水工程作业区,海底极易失稳产生海底滑坡,对深水工程、海底电缆安全有很大的破坏性(表 1)。1999 年,美国用于处理由海底失稳引起安全事件的经费约占深水钻井经费的 30%。在深水工程作业前期、过程中和完工之后,强制要求进行海底浅地层地质灾害调查、海底稳定性分析与预测<sup>[2]</sup>。

## 1 研究流程

海底滑坡失稳调查和评价可以分为地质调查、灾害机理分析、失稳评价等 3 个阶段(图 1),综合地球物理、海底原位监测、实验室测试、数值模拟、物理实验模拟等技术手段,形成一个从前期调查到后期评估建议的完整流程。

## 2 地质调查

### 2.1 地质和地球物理数据分析

海底失稳风险调查必须通过调查船、AUV、ROV、深拖等调查平台,同时借助地质取样、钻孔、孔压测量及原位监测等方法手段,获取土工、地震等一系列原始数据,查明海底的地形地貌和断裂构造活动

收稿日期:2020-01-23

资助项目:国家自然科学基金“南海珠江口外海底峡谷内底形沉积结构与形成机理”(41666002);国家自然科学基金“琼东南盆地深水重力流沉积旋回演化规律与形成机理”(41576049);中国科学院前沿科学重点计划项目“深水海底峡谷-水道地貌特征及形成机理”(QYZDB-SSW-SYS025)

作者简介:司少文(1995—),男,硕士,主要从事海洋地质灾害方面的研究工作。E-mail:sisw@idsse.ac.cn

\* 通讯作者:王大伟(1976—),男,博士,研究员,主要从事深水沉积过程、深水油气和海洋地质灾害方面的研究工作。E-mail:wangdawei@idsse.ac.cn

表1 海底滑坡灾害损失统计表  
Table 1 Loss statistics of submarine landslide disasters

损失类型	编号	年份	地点	诱发滑坡因素	具体描述
电缆	1	1929	纽芬兰岛南部250 km陆坡	7.2级地震	200 km <sup>3</sup> 土体滑移, 跨大西洋海底电缆12处断裂 <sup>[3]</sup>
	2	1946	加拿大佐治亚海峡	7.2级地震	破坏电缆, 引发小型海啸 <sup>[4]</sup>
	3	2003	阿尔及利亚	Boumerdes地震	6条电缆及所有海底通信网络 <sup>[5]</sup>
	4	2006	吕宋海峡	台湾西南部屏东地震	11条光缆断裂, 东南亚断讯12小时 <sup>[6]</sup>
钢架平台 等设施	1	1969	美国密西西比河三角洲南	卡米尔飓风诱发土体失稳	3座钢平台破坏, 其中B平台滑移30 m, 经济损失1亿多美元 <sup>[7]</sup>
	2	1973	渤海湾	水下土体滑动	“渤海湾二号”下沉, 损失3 600万元 <sup>[8]</sup>
	3	2002	意大利斯特龙博利岛	火山山体滑坡, 造成海啸	10 m高海啸席卷100 km外的Milazzo港口 <sup>[9]</sup>
生命财产	1	1923	日本相模湾	7.9~8.3级地震	引发12 m高海啸, 破坏横滨90%建筑, 死亡15.6万人 <sup>[10]</sup>
	2	1979	印度尼西亚	滑坡引发海啸	9 m高海啸, 死亡1 239人
	3	1998	巴布亚新几内	地震滑坡引发海啸	15 m高海啸, 死亡2 000人 <sup>[11]</sup>
	4	2011	日本东北部太平洋海域	西太平洋9.0级地震和海底滑坡引发海啸	死亡11 232人, 并引发福岛第一核电站核泄漏 <sup>[12]</sup>
	5	2018	印尼火山喷发	喀拉喀托火山喷发造成滑坡、诱发海啸	伤亡400多人 <sup>[13]</sup>
	6	2018	苏拉威西岛	Palu-Koro断层走滑引发海底滑坡	引发最大海啸波高7.0 m <sup>[14]</sup>



图1 海底滑坡失稳工作流程

Fig.1 Work flow for submarine landslide instability study

特征, 从而建立区域地质模型, 用于预测潜在海底滑坡区域。

SILVA 等<sup>[15]</sup> 利用浅地层剖面、侧扫声呐、取样测试和测年等技术, 确定了墨西哥湾海底滑坡的年代, 有助于认识海底滑坡机制、评估滑坡再次发生的可能性; HAFLIDASON 等<sup>[16]</sup> 对柱状取样以及浅钻的研究分析, 揭示 Storegga 滑坡规模和发育演化过程; FISHER 等<sup>[17]</sup> 利用声学测深和多道地震数据的解释, 确定于南加利福尼亚芭芭拉海峡的海底滑坡至少发生在 200 ka 以前, 揭示了该区域内的滑坡体主要是地震诱发形成; VANNESTE 等<sup>[18]</sup> 利用多道地震, 在北冰洋斯瓦尔巴特群岛北部发现了 Hinlopen 海底滑坡; SULTAN 等<sup>[19]</sup> 于 2007 年利用 3D 地震、侧扫声呐、钻孔和原位测试, 揭示了尼日利亚河三角洲海底滑坡源区、及其内部结构和沉积

物性质等; CHAYTOR 等<sup>[20]</sup> 利用最新的高分辨率多波束测深和遥控潜水器 (ROV) 在美国大西洋大陆边缘北部的滑坡中, 发现了一系列物理证据, 直观展示滑坡体规模及演变过程; SOBIESIAK 等<sup>[21]</sup> 利用地震对阿根廷西北部的塞罗波拉 (Cerro Bola) 的 MTD 露头详细刻画, 将此 MTD 分为 3 个垂直区域提出了 3 种理论方案来解释基底粉砂岩和砂岩块的破坏和成因。

## 2.2 原位监测

除了地球物理数据和沉积物样品的分析之外, 原位监测也是一种研究海底失稳现象的主要方法, 目前主要应用于天然气水合物开发过程中的海床监测。日本对于海床监测主要有 2 条技术路线: ①高精度水压测量技术, ZUMBERGE 等<sup>[22]</sup> 于 2006

年利用此技术在北海地区监测海床沉降及构造运动, 压力传感器位于基底表面, 矫正计算上覆水体压力差, 即反映海床隆起或沉降; ②三分量加速传感器监测, WALLACE 等<sup>[23]</sup> 利用此方法对新西兰希库朗伊俯冲带进行监测, 以传感器波形得到的加速度波形记录, 计算发现一次沿海俯冲带俯冲构造运动—慢速滑移。美国对墨西哥湾水合物赋存区建立综合监测系统, 其主要由水平监测线阵(SFO)、垂直监测线阵(VLA)、海底边界层监测线阵(BBLA)、海床探针(SFP)、气烟囱监测阵列(CSA)等组成<sup>[24]</sup>。

然而监测海床变形滑动, 世界各国均未完全实现监测数据的实时传输, 也并未完全解决海底原位长期观测的电能供应问题。

在过去 50 年里, 世界各国关于海底滑坡的科学项目、海底监测网络和国际钻探计划(IODP)极富成效和创造力(表 2、图 2)<sup>[25]</sup>。2020 年, IODP 中子项目 SCORE 已对日本海沟针对“3.11”大地震诱发的海底滑坡和海啸沉积层进行钻探, 取得初步 100 m 连续沉积样品, 发现 MTD, 揭示过去 1 500 a 以来海底滑坡的形成机理和灾害效应<sup>[26]</sup>。

表 2 海底滑坡研究项目统计

Table 2 Statistics of submarine landslides

年份	项目名称	研究地区/技术手段/设备参数
1984—1991	GLORIA	美国专属经济区
1989—1992	ADFEX	北极三角洲
1993—1996	STEAM	欧洲大西洋边缘
1995—2001	STRATAFORM	墨西哥湾西北部大陆架边缘
1996—1999	ENAM II	欧洲北大西洋边缘
欧洲2000—2004, 加拿大2000—2005	COSTA	亚得里亚海、西北地中海
2016	爱尔兰ERC CODEMAP	利用ROV对Rockall Bank滑坡综合体获取精细3D模型
2006年(建成)	加拿大观测网(ONC)	总长850 km, 主机站5个
2008年(启动)	欧洲海底观测网(EMSO)	主机站15个
2012年(启动)	中国南海海底观测系统	总长150 km, 主机站1个
	日本海底观测网络DONET	总长300 km, 主机站7个, 连接部分IODP海底钻孔观测点
2015年(建成)	日本海底观测网络DONET2	总长450 km, 主机站7个
	日本海底观测网络S-net	总长5 700 km
2016年(启动)	美国海底观测网(OOI)	总长880 km, 主机站7个
2020年(启动)	IODP 386 航次	日本海沟, 18个站点, 海底以下40 m钻探

### 3 灾害机理分析

#### 3.1 致灾因素

海底滑坡的触发因素种类繁多, 且实际情况中海底滑坡的形成通常受到多种因素的综合影响, 包括海平面变化、构造变动、坡度、流体渗漏和水合物分解等<sup>[27]</sup>。控制海底滑坡的因素虽多, 但其原理都是某种因素导致上覆沉积物的剪切应力大于其抗剪强度, 并在重力的作用下沿着剪切破坏面向坡下运移<sup>[28]</sup>。

灾害机理分析主要为诱因和滑移过程分析, 风险性量化评估首先应探讨滑坡形成机制。LOCAT 和 LEE<sup>[29]</sup>, URGELES 和 CAMERLENGHI<sup>[30]</sup> 对地中海的海底滑坡进行统计分析, 本文综合以上学者成果修改建立了概念性的过程框图(图 3), 15 种相

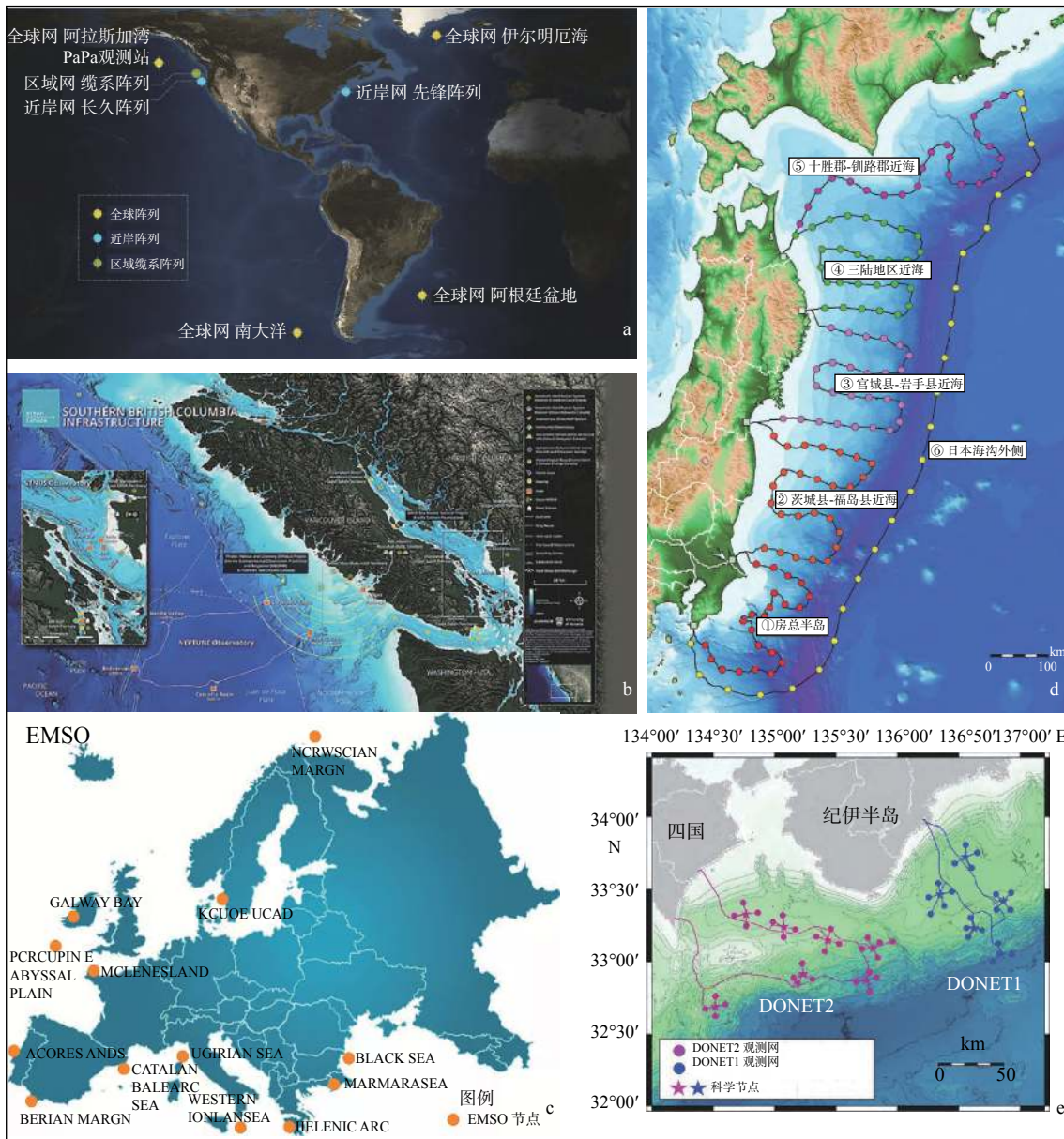
关因素大体分为 2 部分, 从 FF 至 HS 均会在土体内部产生孔隙压力异常, 致使抗滑力下降, 而 HS 至 AN 均以外界加载较多, 应力增大从而导致失稳, 其中 EQ 及 HS 占比 50% 以上。除此之外, 海面上的船只抛锚、钻井平台、陆架冰川和海面以下的枯竭油藏、高压层也会对海底造成扰动。根据以上工作选择失稳模型, 建立三维土工模型进行不稳定性模拟(物理模拟、数值模拟等)。

#### 3.2 物理模拟

##### 3.2.1 水槽实验

由于前期地质调查的数据不连续性及海底滑坡的难以捕捉性, 现今物理实验条件下通常采用水槽再现海底滑坡的失稳过程以和后续沉积物运移过程, NAJAFI 和 ATAIE<sup>[31]</sup>、BLASIO 等<sup>[32]</sup>、PAN-IZZO 等<sup>[33]</sup>、MARR 等<sup>[34]</sup>、李小超等<sup>[35]</sup>、王家生等<sup>[36]</sup>





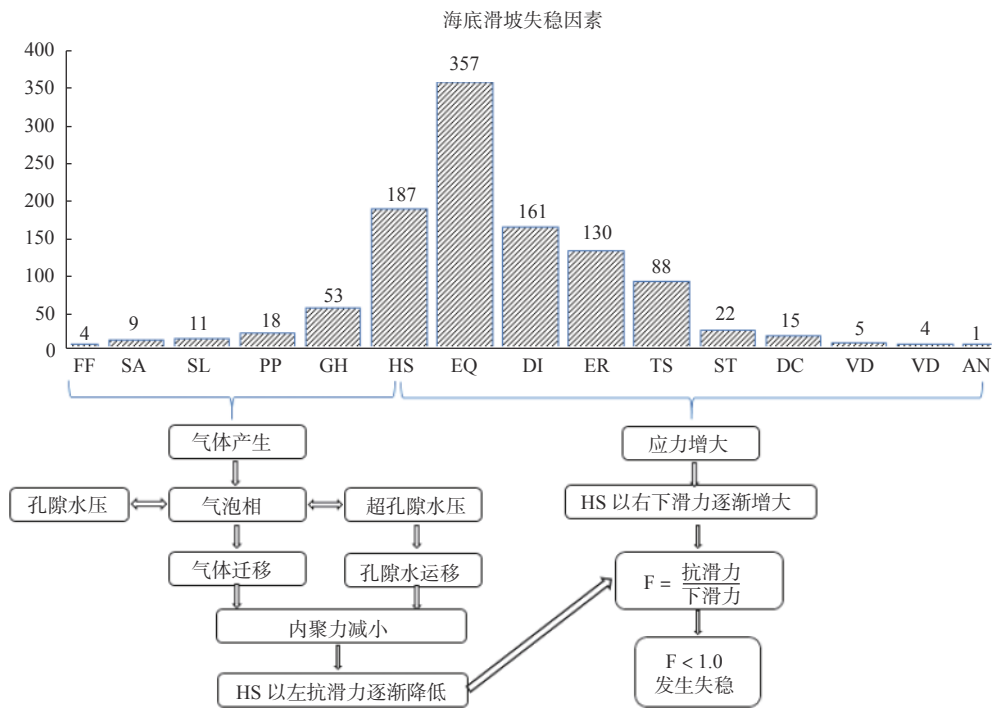
a) 美国海底观测网(OOI), 引自 <https://oceanobservatories.org>; b) 加拿大观测网(ONC), 引自 <https://www.oceannetworks.ca/>; c) 欧洲海底观测网络(EMSO)节点分布图, 引自 <https://www.emso-eu.org/>; d) 日本 S-net 海底地震海啸观测网, 引自 <https://www.seafloorbosai.go.jp/S-net/>; e) 日本 DONET1 和 DONET2 海底观测网, 引自 <https://www.jamstec.go.jp/donet/e>

图 2 世界各国海底观测网系统

Fig.2 World ocean observation network systems

在天然重力条件下建立二维、三维水槽试验, 对沉积物本身及水槽参数进行大量改进, 利用传统高速相机及压力监测仪进行数据采集。近些年, 新技术不断出现, 滑坡水槽实验也逐渐和海啸滑坡模拟实验结合起来, 相关模拟转向波浪。WHITTAKER 等<sup>[37]</sup>便利用粒子跟踪测速(PTV)技术, 对海底滑坡产生的波浪使用激光诱导荧光(LIF), 该技术可在整个实验水槽的整个长度上提供高质量的自由表面测量, 得到一系列滑坡加速度及最终速度, 并正确地预测了低弗洛德数下整个波场的行为; WANG 等<sup>[38]</sup>

在水槽中引入超声波岩石物理实验, 模拟了不同沉积类型海底, 例如粉砂、细砂、粗砂和泥质, 经过模拟水声数据处理后, 发现了一些对不同类型的沉积物敏感的物理属性。其中加权平均频率属性可以区分粗砂, 粉砂和细砂, 瞬时品质因数(Q)属性突出显示了受加权平均频率属性约束的泥质。通过分析孔隙率, 密度与这些敏感的声学属性之间的关系, 可以通过人工神经网络方法推导和反演水槽中的沉积物类型; ZHANG 等<sup>[39]</sup>在波浪槽中的模拟实验分析了波浪作用下海底斜坡的破坏条件和破坏机



火山(VD);地震(EQ);构造频繁(TS);削峭作用(ST);侵蚀加剧(ER);差异压实(DC);底辟作用(DI);火山隆升(VU);人类活动(AN);高沉积速率(HS);流体流动加快(FF);超孔隙压力增大(PP);天然气水合物分解(GH);气体迁移(GA);海平面下降(SL)

图 3 海底滑坡失稳因素图

Fig.3 Schematic of the internal architecture for MTCs

理,提出了液化滑移破坏,剪切破坏和浅层侵蚀破坏引起海底破坏的机理。

目前,水槽实验限定参数与实际的复杂搬运过程依然存在较大差异,尤其是尺度问题,所以,近年来,对于水槽的模拟实验通常只是去定量测试单个土体参数,还需配合离心机试验和数值模拟等。

### 3.2.2 离心机试验

土工离心机能够模拟地球的重力场及定制其他现场条件,模拟断层错动以及地震波对滑坡的影响。ISHIMARU 和 KAWAI<sup>[40]</sup>利用土工离心机、BRENNAN 等<sup>[41]</sup>使用安装了振动台的离心机、GAUDIN 和 WHITE<sup>[42]</sup>设计相应的滑动触发装置、成都理工大学<sup>[43]</sup>综合离心机试验和数值模拟、以及西澳大学、剑桥大学、大连理工大学等采用鼓式离心机,通过安装差异位移设备和振动台证实了离心机模拟技术的有效性,做出了不同材料、不同条件下的冲击海底管道模拟试验。对于旋转过程中施加地震波是近些年的热点,也是对应于前文中地震诱因形成的失稳滑坡体,但是“滑水现象”(hydroplaning)同样也是滑坡高流动性的原因。

前人的大多数实验研究均是在 1 g 模型中进行,根据 ADAMIDIS 和 MADABHUSHI<sup>[44]</sup>在离心机上一系列的试验得出结论表明:  $d_p = N^3 * d_m$ ,  $d_m$  为模

型传播距离,  $N$  为水平加速度,所以校正后的实际滑移距离  $d_p$  无法代表真实滑坡, ACOSTA 等<sup>[45]</sup>通过 40 g 加速度,容量为 100 g·t<sup>1</sup> 的 UENF 中型离心机,通过不同含水量高岭土砂层的模拟实验,证实滑坡面存在一薄层泥浆,该泥浆显著增加了碎屑流的剪切阻力,并且含水量对流体压力、法向应力及弗洛德数均有影响,但无进一步试验。地震激励作用下具有弱夹层(WIL)的边坡的抗震性能和动态变形模式对于海底工程结构中的适当抗震设计非常重要,地震引发的斜坡动力响应仍未得到很好的了解, YAN 等<sup>[46]</sup>为研究 WIL 边坡对地震的响应动力特性,在 50 g 超重力下输入不同的地震运动,结果显示:加速度与坡度的增加呈正相关,在波峰和顶面达到最大值,而在 WIL 处则随高度的增加而发生突变。WIL 处的加速度放大与输入的峰值有关。以加速度峰值 0.15 为界线,  $a \leq 0.15$  时,插入层的放大系数与峰值的减小呈正相关,但当  $a > 0.15$  时,插入层的放大系数与峰值的减小呈负相关,即边坡结构效应影响了 WIL 处的加速度放大。

但是仅凭离心机是对试验参数限定是远远不够的,需不断地结合不同工程功能的辅助仪器, LEE 等<sup>[47]</sup>开发了一种地震锥体渗透测试(SCPT)系统,用于通过测量圆锥体的渗透阻力( $qc$ )和剪切波



速度( $V_s$ ), 定量评估土体强度和刚度随深度的变化。离心测试中时使用 SCPT 系统是一种用于测量滑坡中土壤特性的合适技术。而在以后发展中, 离心机配合辅助设备、数值模拟等相互印证将成为热点。

### 3.3 数值模拟

在过去的几十年中, 人们付出了巨大的努力来模拟滑坡海啸的产生。使用了不同程度简化的各种计算模型; 例如浅水理论<sup>[48]</sup>、完全非线性势流<sup>[49]</sup>、Boussinesq 方程<sup>[50]</sup>、非静水波方程、和 Navier–Stokes 方程<sup>[51]</sup>。这些模型中的大多数将滑坡视为具有规定的滑坡形状和行为的刚性实体。滑动通常是通过运动边界条件来解释的, 是基于滑动质量上的动态力平衡来指定的。从这个意义上讲, 需要更高级的模型, 使滑块变形并能够描述滑块与周围水之间的双向耦合, 当然并不意味着刚体模拟行不通了, 如 PAKOKSUNG 等<sup>[52]</sup> 针对海啸滑坡, 基于潮汐仪的波形和跟踪数据验证了模型的准确性, 省略了地震时海底变形产生的较小海啸, 仅分析了海底滑坡产生的海啸。

目前常用海底滑坡模拟软件有 PLAXIS、FLAC3D、ABAQUS、QUIVER、ANSYS、GEO-SLOPE、CARIS HIPS, 大多数滑坡建模为流变材料或颗粒流。如 IMRAN 等<sup>[53]</sup> 提出了一个一维两层数值模型(BING 1D)来描述海底泥石流的下坡发展。ATAIE-ASHTIANI 和 SHOBEYRI<sup>[54]</sup> 使用无网格平滑粒子流体动力学(SPH)方法开发了类似的模型。杨林青<sup>[55]</sup> 基于 SPH 深度积分法模拟海底滑坡, 直观展示了海底沉积物的滑移过程, 此法中 DAN-3D<sup>[56]</sup> 模型作为一种无网格颗粒法, 克服了例如 FDE 无法确定自由表面准确位置和 FEM 处理大变形问题时网格扭曲的问题, 此模型还可通过调整泥浆的流变性来预测滑坡诱发的波浪规模。GIACHETTI 等<sup>[57]</sup> 开发了深度平均的颗粒流模型, 该模型与浅水流模型相结合, 以模拟由滑坡碎屑产生的海啸。ABADIE 等<sup>[58]</sup> 使用 3D 多流体 Navier–Stokes 模型 THETIS 来模拟由 Canary Vieja 火山(CVV)西侧的潜在坍塌产生的海啸波。

以上模型均不能完全模拟展示海底滑坡的复杂发展过程。位于伊朗和巴基斯坦南部海岸的马克兰俯冲带(MSZ)在 1945 年经历毁灭性的马克兰海啸, 造成 4000 多人死亡。对马克兰海啸的研究仍存在未解决的问题, 尤其是海啸波高与到达时间之间的不匹配, 数值模型结果与现有数据之间的重

大差异, 揭示了海啸发生期间涉及的另一机制的存在。RASTGOFTAR 和 SOLTANPOUR<sup>[59]</sup> 对 1945 年地震引发的海底滑坡进行了研究, 将其作为马克兰海啸的主要来源。使用具有精细嵌套网格的高分辨率测深数据, 以提高建模的海啸波高的准确性, 证实了所报告的海啸波与模拟值之间的巨大差异。假设可能发生的滑坡的位置和大小, 将 TOPICS 和 FUNWAVE 模型结合起来的 GEOWAVE 模型用于模拟 1945 年非地震海啸, 结果表明与巴基斯坦、伊朗和印度不同地区的海啸波高报告的情况基本吻合。如果假定地震后海底滑坡的发生时间延迟了 3.5 h, 那么也可以解释海啸波在巴基斯坦的 Pasni 和 Karachi 的到达时间。

随着计算机计算能力的不断提高, 无网格类的数值模拟的近似函数一般较为复杂、当粒子数量较多时计算量过大等问题逐步解决, 与有限元/边界元/离散元/有限差分以及概率法(FORM 法和 Monte Carlo 法)开始显示优势。充分利用沉积物样本约束模型, 预处理的边坡与地震地面震动耦合等配合水槽实验和离心机试验之间的相互耦合, 才是未来数值模拟的方向。

## 4 稳定性评价

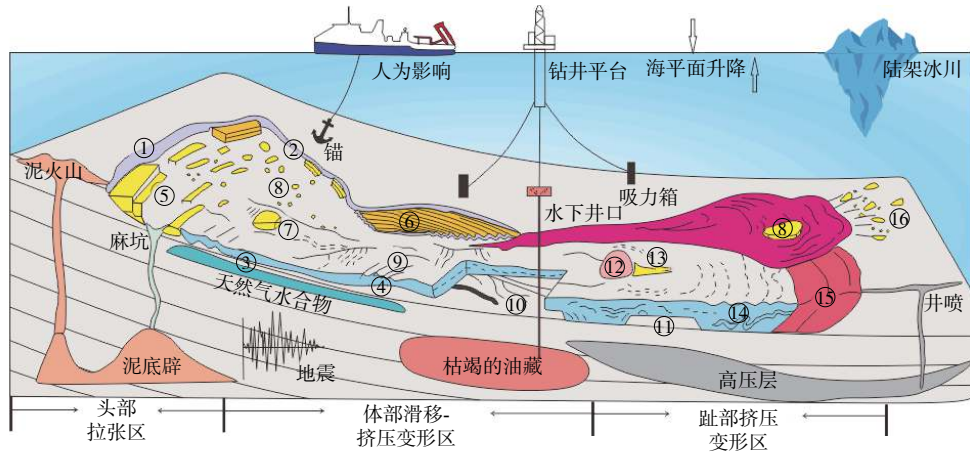
海底滑坡是全球主要的海洋地质灾害之一, 实时观察滑坡几乎是不可能的, 为了更好地估计其风险并制定缓解措施, 从海底滑坡范围确定、危险性分析和灾后评价等 3 个步骤进行稳定性评价。

### (1) 海底滑坡范围确定

传统柱状沉积物样品是主要信息来源, 近期对海底滑坡的顶壁陡坡的研究主要基于地球物理数据和对陆地上类似物的描述。随着 ROV 的可用性不断提高, 在深海环境中进行现场调查成为可能。2016 年, 爱尔兰政府和 ERC CODEMAP 项目资助的 SORBEH 航行, 针对爱尔兰西部的 Rockall Bank 滑坡复合体, 配合精细地层资料及现场视频数据生成高分辨率的 3D 模型, 还原真实场景, 对滑塌体的成因机制以及演化历史有了更深入的了解。目前 BULL 等<sup>[27]</sup> 的海底滑坡内部结构模式(图 4)揭示滑坡运动所形成的各滑坡失稳特征, 均可通过各类地质调查手段等识别并量化。

### (2) 危险性分析

对于滑坡, 地质学家一般说“将今论古”, 地貌学家采用“过去和现在是未来的关键”的原则, 这

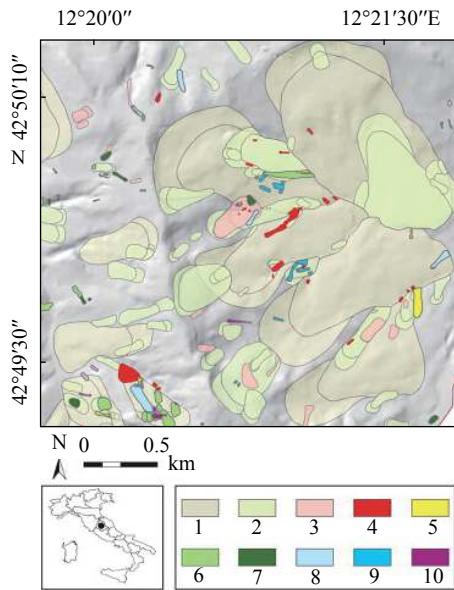


①头壁;②侧壁(陡坎);③滑移剪切面;④局部隆起;⑤拉张脊与块体;⑥侧向挤压脊;⑦残留块体;⑧漂块;  
⑨挤压脊;⑩底界剪切面沟槽;⑪底界斜坡与平地;⑫火山等正地形;⑬二次流建造;⑭褶皱;⑮褶皱与逆冲体系;⑯逸出块体浊流体系

图 4 海底滑坡内部结构模式图解

Fig.4 Multi-temporal landslide map of the Monte Castello area

是统一的结果。该原理表明,在导致过去不稳定的条件下,边坡失稳更有可能发生。因此,识别现今边坡失稳对探测和绘制滑坡具有重要的意义。通常,相同类型的整体运动将导致相似的滑坡特征,可以解释滑坡留下的形态特征,用于确定边坡失稳的程度、年龄、深度,并推断运动的类型。例如,意大利翁布里亚 Monte Castello 地区的多时相滑坡地图(图 5)<sup>[28]</sup>,通过 1941—1997 年间飞行的 5 套航空照片上地貌特征识别和 2010 年的野外观察勘测而制得的,不同年代的滑坡由不同颜色所表示。



1.1941 年之前主滑坡;2.1941 年之前次生滑坡;3.1941 年的滑坡;  
4.1941—1945 年的活动滑坡;5.1954 年的活动滑坡;6.1955—1976 年  
期间滑坡;7.1977 年期间发生的滑坡;8.1978—1984 年期间发生的滑  
坡;9.1985 年发生活动的滑坡;10.2010 年冬季滑坡

图 5 Monte Castello 地区的多时相滑坡地图<sup>[28]</sup>

Fig.5 Instability factors of submarine landslide<sup>[28]</sup>

(3) 灾后评价

由于海底滑坡失稳的成灾机理的复杂性以及各类手段的局限性,诸如地球物理、空间遥感、水下工程等传统手段数据不能和数值模拟、物理试验模拟等数据很好拟合,缺少完整的海底滑坡数据及体系支撑,所以对滑坡的类型、范围、滑移轨迹、空间/时间概率等的分析仅处于定性或半定量的状态。随着美国 NOAA、全球灾害数据库 EM-DAT、阿里云地质灾害数据库等灾后损失评估及针对应急预案逐渐成熟,未来发展应为多学科、多组织、广融合,使得滑坡历史数据编录、探测、识别、监测预警形成完整流程,实现海底滑坡“透明化”。

5 存在问题及发展趋势

传统多波束测深、三维地震勘探、深海钻探、声呐成像系统、地理信息系统是识别海底滑坡形态等有效手段,均为宏观层面上分析基底物质运输,很少研究其失稳机理。在某些沉积环境(例如斜坡盆地)中,滑坡碎屑可以保留在地层中并使用 3D 数据进行分析。但是,在诸如海底峡谷等侵蚀性环境中,往往很少或没有残留沉积物,对滑坡过程的解释必须基于滑痕,而滑痕由于峡谷环境的动态性质而经常被严重修改。因此,准确解释和量化滑坡参数对于确定滑坡群的机制十分重要,物理实验模拟及数值模拟是目前最为经济可行的方法,但理论模型往往与实际大尺度的实地资料、流变参数有较大出入,如模拟海底滑坡对海底管线的冲击,很难测量其角度、法向力、切向力之间的关系,难以实验验证;与地震海啸相比,滑坡诱发海啸其特征在

于相对较短的波长,频率分散效应在波的演化过程中可能非常明显甚至占主导地位。现今海底滑坡数值模拟应考虑滑坡和相关波之间的相互作用等因素。

陆地滑坡研究已经建立了完整评价流程,但是,海底滑坡失稳评价流程由于滑坡随机性强,捕捉难,不能掌握全失稳区土体力学性质,2017年,PUZRIN等<sup>[60]</sup>通过基于GIS的极限平衡无限边坡岩土力学模型的应用,建立了完善的边坡稳定性概率评估方法。2018年, MOUNTJOY和MICALLEF<sup>[61]</sup>对海底滑坡的发生机制、过程模拟做较多阐述,但也并未涉及完整评价流程。以天然气水合物开采为例,近年来,其商业价值已引起越来越多的关注,其稳定性评价逐渐成为海底失稳研究中的热点,应加强考虑实际开采条件,以及断层、滑动面等软弱结构的影响,从更大尺度上进行精细数值模拟分析,为未来商业化开发提供有力的安全评价。

#### 参考文献:

- [1] BUGGE T, BELDERSON R, KENYON N H, et al. The storegga slide[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1988, 325(1586): 357-388.
- [2] CHAYTOR J D, BRINK U S T, SOLOW A R, et al. Size distribution of submarine landslides along the U. S. Atlantic Margin[J]. *Marine Geology*, 2009, 264(1/2): 16-27.
- [3] KRSTEL S, FELDENS P, GEORGIOPOULOU A, et al. The grand banks landslide area revisited[C]//AGU Fall Meeting, 2016: 57-62.
- [4] CLAGUE J J, BOBROWSKY P T, HUTCHINSON I. A review of geological records of large tsunamis at Vancouver Island, british columbia, and implications for hazard[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(9): 852-863.
- [5] OUYED M, IDRES M, BOURMATTE A, et al. Attempt to identify seismic sources in the eastern Mitidja Basin using gravity data and aftershock sequence of the Boumerdes (May 21, 2003; Algeria) earthquake[J]. *Journal of Seismology*, 2011, 15(2): 173-189.
- [6] HSU S K, KUO J, LO C L, et al. Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung earthquake off sw Taiwan[J]. *Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences*, 2009, 19(6): 767-772.
- [7] BAEHR J N, REES S I, BOATMAN T H, et al. Public acceptance of structural solutions to hurricane damage in post-katrina Mississippi[C]//American: ASCE, 2008: 72-79.
- [8] 方振寿. “渤海2号”翻沉真相[J]. *中国石油石化*, 2013(23): 76-79.
- [9] TOMMASI P, BALDI P, CHIOCCI F L, et al. The landslide sequence induced by the 2002 eruption at Stromboli volcano[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 755-763.
- [10] BRYANT E. Earthquake-generated tsunami[M]. Springer International Publishing, 2014: 85-102.
- [11] BUNZ S, MIENERT J, BERNDT C. Geological controls on the storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2003, 209(3/4): 278-307.
- [12] GU C. Geographical report of 311 earthquake in Japan[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(6): 853-861.
- [13] HEIDARZADEH M, MUHARI A, WIJANARTO A B. Insights on the source of the 28 September 2018 Sulawesi tsunami, Indonesia based on spectral analyses and numerical simulations[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2018, 178(3): 67-73.
- [14] PAKOKSUNG K, SUPPASRI A, IMAMURA F, et al. Simulation of the submarine landslide tsunami on 28 September 2018 in Palu Bay, Sulawesi Island, Indonesia, using a two-layer model[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, 176(12): 78-95.
- [15] SILVA A J, BAXTER C D P, LAROSA P T, et al. Investigation of mass wasting on the continental slope and rise[J]. *Marine Geology*, 2004, 203(3): 355-366.
- [16] HAFLIDASON H, SEJRUP H P, NYGRD A, et al. The storegga slide: architecture, geometry and slide development[J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1/4): 201-234.
- [17] FISHER M A, NORMARK W R, GREENE H G, et al. Geology and tsunamigenic potential of submarine landslides in Santa Barbara Channel, southern California[J]. *Marine Geology*, 2005, 224(1): 1-22.
- [18] VANNESTE M, BERNDT C, LABERG J S, et al. On the origin of large shelf embayments on glaciated margins: effects of lateral ice flux variations and glacio-dynamics west of Svalbard[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(19/21): 2400-2419.
- [19] SULTAN N, VOISSET M, MARSSET B, et al. Potential role of compressional structures in generating submarine slope failures in the Niger Delta[J]. *Marine Geology*, 2007, 237(3/4): 169-190.
- [20] CHAYTOR J D, DEMOPOULOS A W J, BRINK U S T, et al. Assessment of canyon wall failure process from multibeam bathymetry and remotely operated vehicle (rov) observations, Us Atlantic continental margin[M]. Berlin: Springer International, 2016: 72-86.
- [21] SOBIESIAK M S, ALSOP G I, KNELLER B, et al. Sub-seismic scale folding and thrusting within an exposed mass transport deposit: a case study from nw argentina[J]. *Journal of Structural Geology*, 2017, 96(5): 176-191.
- [22] ZUMBERGE M, ALNES H V, EIKEN O, et al. Precision of seafloor gravity and pressure measurements for reservoir monitoring[J]. *Geophysics*, 2008, 73(6): 133-141.
- [23] WALLACE L M, WEBB S C, ITO Y, et al. Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand[J]. *Science*, 2016, 352(6286): 701-704.



- [24] 朱超祁. 海底天然气水合物开采导致的地质灾害及其监测技术[J]. 灾害学, 2017(3): 58-62.
- [25] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2017(3): 321-330.
- [26] KUBO Y, INAGAKI F, TONAI S, et al. New Chikyu Shallow Core Program (SCORE): exploring mass transport deposits and the seafloor biosphere off Cape Erimo, northern Japan[J]. Scientific Drilling, 2020, 27: 25-33.
- [27] BULL S, CARTWRIGHT J, HUUSE M. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data[J]. Marine & Petroleum Geology, 2009, 26(7): 1441-1451.
- [28] GUZZETTI F, MONDINI A C, CARDINALI M, et al. Landslide inventory maps: new tools for an old problem[J]. Earth Science Reviews, 2012, 112(1/2): 42-66.
- [29] LOCAT J, LEE H J. Submarine landslides: advances and challenges[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(1): 193-212.
- [30] URGELES R, CAMERLENGHI A. Submarine landslides of the Mediterranean Sea: trigger mechanisms, dynamics, and frequency-magnitude distribution[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2013, 118(4): 2600-2618.
- [31] NAJAFI-JILANI A, ATAIE-ASHTIANI B. Estimation of near-field characteristics of tsunami generation by submarine landslide[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(5/6): 545-557.
- [32] BLASIO F V D, BREIEN H, ELVERHI A. Modelling a cohesive-frictional debris flow: an experimental, theoretical, and field-based study[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 36(6): 753-766.
- [33] PANIZZO A, GIROLAMO P D, PETACCIA A. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2005, 110(12): 58-70.
- [34] MARR J G, HARFF P A, SHANMUGAM G, et al. Experiments on subaqueous sandy gravity flows: the role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures[J]. Geological Society of America Bulletin, 2001, 113(11): 1377-1386.
- [35] 李小超, 常留红, 李凌, 等. 水槽混合石料群抛试验[J]. 水利水电科技进展, 2017(6): 80-98.
- [36] 王家生, 陈立, 刘林, 等. 黏性泥沙分层运动特征的试验研究[J]. 水科学进展, 2008(01): 15-20.
- [37] WHITTAKER C, NOKES R, DAVIDSON M. Tsunami forcing by a low froude number landslide[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2015, 15(6): 1215-1239.
- [38] WANG Q, WANG Y, HU X Y, et al. Marine rock physical flume experiment: the method of seafloor shallow sediment recognition by ultrasonic physical attributes[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015(115): 197-205.
- [39] ZHANG M, ZHANG W, HUANG Y L, et al. Failure mechanism of submarine slopes based on the wave flume test[J]. Natural Hazards, 2019(2): 27-34.
- [40] ISHIMARU M, KAWAI T. Basic study on the evaluation of seismic stability of rock slope using centrifuge model test[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2011, 67(1): 36-49.
- [41] BRENNAN A J, MADABHUSHI S P G. Amplification of seismic accelerations at slope crests[J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 2009, 46(5): 585-594.
- [42] GAUDIN C, WHITE D J. New centrifuge modelling techniques for investigating seabed pipeline behaviour[J]. Earth Science Reviews, 2009, 56(4): 78-87.
- [43] 蒋金阳. 软硬互层边坡倾侧变形破坏特征及支护效果的大型离心机试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [44] ADAMIDIS O, MADABHUSHI G S P. Use of viscous pore fluids in dynamic centrifuge modelling[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2015, 15(3): 141-149.
- [45] ACOSTA E A, TIBANA S, JR F S. Centrifuge modeling of hydroplaning in submarine slopes[J]. Ocean Engineering, 2017, 129: 451-458.
- [46] YAN K M, ZHANG J J, CHENG Q G, et al. Earthquake loading response of a slope with an inclined weak intercalated layer using centrifuge modeling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018(13): 72-85.
- [47] LEE M G, CHO H I, KIM J H, et al. Development of seismic cpt for evaluating in-flight soil properties in centrifuge model test[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2017, 22(9): 1-11.
- [48] HARBITZ C B. Model simulations of tsunamis generated by the storegga slides[J]. Ocean Engineering, 1992, 105(1/4): 1-21.
- [49] GRILLI S T, VOGELMANN S, WATTS P. Development of a 3D numerical wave tank for modeling tsunami generation by underwater landslides[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2002, 26(4): 301-313.
- [50] FUHRMAN D R, MADSEN P A. Tsunami generation, propagation, and run-up with a high-order boussinesq model[J]. Coastal Engineering, 2008, 56(7): 747-758.
- [51] HERRILLO J, WOOD A, KIM G B, et al. A simplified 3-D navier-stokes numerical model for landslide-tsunami: application to the Gulf of Mexico[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2019, 118(12): 112-132.
- [52] PAKOKSUNG K, SUPPASRI A, IMAMURA F, et al. Simulation of the submarine landslide Tsunami on 28 September 2018 in Palu Bay, Sulawesi Island, Indonesia, using a Two-Layer Model[J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(1): 3233-3250.
- [53] IMRAN J, HARFF P, PARKER G. A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface[J]. Computers & Geosciences, 2015, 27(6): 717-729.
- [54] ATAIE-ASHTIANI B, SHOBEYRI G. Numerical simulation of landslide impulsive waves by incompressible smoothed particle hydrodynamics[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2008, 56(2): 209-232.
- [55] 杨林青. 海底斜坡稳定性及滑移影响因素分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [56] SAUTHIER C, LABIOUSE V, PIRULLI M, et al. Numerical simulation of gravel unconstrained flow experiments: a comparison between dan-3D and rash-3D codes[J]. Marine Geology,

- 2010, 32(42): 39-35.
- [57] GIACHETTI T, PARIS R L, KELFOUN K, et al. Numerical modelling of the tsunami triggered by the güimar debris avalanche, tenerife (Canary Islands): comparison with field-based data[J]. *Marine Geology*, 2011, 284(1/4): 189-202.
- [58] ABADIE S M, HARRIS J C, GRILLI S T, et al. Numerical modeling of tsunami waves generated by the flank collapse of the Cumbre Vieja volcano (la Palma, Canary islands): tsunami source and near field effects[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, 117(5): 85-96.
- [59] RASTGOFTAR E, SOLTANPOUR M. Study and numerical modeling of 1945 makran tsunami due to a probable submarine landslide[J]. *Natural Hazards*, 2016, 83(2): 1-17.
- [60] PUZRIN A M, RUSHTON D, MACKENZIE B, et al. Submarine landslides—stability analysis and risk assessment for offshore developments[M]. Zurich: John Wiley and Sons, 2017.
- [61] MOUNTJOY J, MICALLEF A. Submarine landslides[M]. New Zealand: Submarine Geomorphology, 2018.

## SEABED INSTABILITY INVESTIGATION AND ASSESSMENT PROCEDURES

SI Shaowen<sup>1,2,3</sup>, WANG Dawei<sup>2\*</sup>, HE Huizhong<sup>4</sup>, SUN Yue<sup>2,3</sup>, SUN Jin<sup>2</sup>, WU Shiguo<sup>2</sup>

(1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2 Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, Hainan, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4 South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China)

**Abstract:** Unlike continental landslides, underwater landslides are hard to be observed due to the specific hydrodynamic conditions. So far there have been no standards and guidelines available for the procedures on disaster-causing mechanism studies and instability assessment, which involves not only the in-depth study of seabed instability, but also the formation and evolution of buttle and abyss, deep sea project development, business interests, marine geological disaster forecast, safety of the marine engineering and constructions, and other problems. With the rapid progress in China's marine scientific survey and various submarine projects, great achievements have been made by China in the past decades, in particular in the following three aspects: marine geological survey, disaster mechanism analysis and instability assessment. By integrating geophysical, in-situ seabed monitoring, numerical simulation, physical experiment simulation and other techniques, a complete process from early investigation to late evaluation is preliminarily presented in this paper, which is critical important for seabed stability assessment indeed.

**Key words:** seabed instability; marine engineering geological survey; seabed stability evaluation; submarine landslide