

# 海底滑坡及其反射地震识别综述

## Current status of submarine landslides and their seismic recognition

何叶<sup>1,2</sup>, 钟广法<sup>2</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 广州 510 240; 2. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

中图分类号: P736.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)01-0116-10

doi: 10.11759/hyqx20130714001

海底滑坡是一种重要的地质营力, 对于海底地貌塑造、海底沉积物搬运和沉积具有重要意义<sup>[1]</sup>, 对于油气和水合物的聚集成藏亦具有重要的影响<sup>[2-7]</sup>。同时, 由于海底滑坡破坏海底的稳定性, 其对海底工程(如海底光缆、海上石油钻井平台等)和环境也构成潜在的威胁<sup>[8-9]</sup>。因此, 近年来海底滑坡研究正越来越受到工业界和学术界的关注。

由于沉积物在海底滑移时受到的浮力较大, 海底滑坡的规模通常要比陆地滑坡大很多<sup>[10]</sup>。目前全球范围内记录在案的最大海底滑坡是发生在南非海上的 Agulhas 滑坡, 其滑移距离超过 140 km, 作为单一滑坡事件, 它所搬运的沉积物的体积高达 20 000 km<sup>[11]</sup>。人们对海底滑坡毁灭性的破坏作用进行关注至少可以追溯到 1923 年发生在日本相模湾的关东大地震<sup>[12]</sup>及 1929 年发生在纽芬兰大浅滩(The Grand Banks)的地震<sup>[13]</sup>, 这些海底大地震所引发的大型滑坡严重破坏了当地的海底电缆等工程设施, 从而成为海底滑坡研究中尤为关注的著名事件。

由于海底滑坡体的规模巨大, 各种高精度的地球物理方法, 主要有旁扫声纳、多波束测深、浅地层剖面、二维或三维反射地震等, 在海底滑坡的识别、描述及形成机理研究中发挥了重要作用<sup>[1, 8, 10, 14-15]</sup>。随着石油勘探开发向深水进军, 深海反射地震数据的采集量与日俱增, 这些数据已越来越多地用于包括深海滑坡在内的海洋地质科学和工程问题的研究之中<sup>[16-21]</sup>。国内对于海底滑坡的研究起步较晚, 但发展迅速, 已在东海和南海北部陆坡发现了一批海底滑坡体<sup>[22-32]</sup>, 但研究成果还比较分散, 在系统性及深度和广度上有待深入和扩展。本文在对国外海底滑坡研究文献进行专题调研和分析的基础上, 对海

底滑坡的定义、分类、结构模式进行综述, 并着重对海底滑坡的反射地震识别标志进行了总结, 希望能对国内开展相关研究提供参考和借鉴。

### 1 海底滑坡的定义及触发机制

“海底滑坡”(submarine landslide), 亦称块体运动(mass movement)、斜坡失稳(slope failure)、物质消耗(mass wasting)等, 在文献中缺乏统一的定义。一般情况下, 海底滑坡是在重力作用下的海底沉积物顺坡移动的统称<sup>[1, 8-10, 20, 33-35]</sup>(表 1)。综合各种定义, 我们可以将“海底滑坡”定义为: 由于环境负载和抗剪强度的变化, 海底斜坡上的岩块或沉积物受重力驱动沿剪切破坏面向下移动的过程。滑坡过程形成的沉积物或沉积体, 称为“滑坡体”, 也简称为“滑坡”。

海底滑坡在沉积物厚而松软、坡度陡峭、周围环境施加的应力荷载较高的地方更容易发生, 包括海湾、三角洲、海底峡谷和海底扇、开放陆坡、火山岛坡或其他活跃的构造变形区<sup>[8, 10, 14, 36-38]</sup>。海底滑坡对坡度的要求不高, 一般达到 2°至 3°即可发生<sup>[39]</sup>。特殊情况下, 如在地震或者其他外加条件刺激下, 坡度低至 0.5°甚至更低也能发生<sup>[40-41]</sup>。从形成原因上来说, 当斜坡上沉积体所承受的驱动剪切力大于有效抗剪强度时, 斜坡的失稳就会引发海底滑坡。驱动剪切力可以来自于重力作用、地震或风暴等, 而有效抗剪强度则可能由于孔隙水压力、地下水(气)渗流、沉积物

收稿日期: 2013-07-14; 修回日期: 2014-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(91028003, 40476030); 南海天然气水合物成矿理论及分布预测研究项目(GZH2011003-05)

作者简介: 何叶(1989-), 女, 湖南衡阳人, 硕士, 主要从事地震数据解释研究, 电话: 021-65982784, E-mail: vivia.lotus@163.com

表 1 海底滑坡的定义

术语	定义
Slope failure	(1) 通常指由于环境负载和抗剪强度的变化, 海底斜坡沉积物或岩块被破坏的行为 <sup>[33-34]</sup> 。 (2) 指滑坡物质的下滑运动所产生的被破坏海底区域 <sup>[1]</sup> 。
Landslide	(1) 指沿着被剪切破坏的斜坡面向下或向外的移动, 通常认为是斜坡失稳行为的结果 <sup>[10]</sup> 。 (2) 指滑坡物质的下滑运动所产生的被破坏海底区域 <sup>[1]</sup> 。
Mass movement	与 landslide 同义, 泛指重力驱动的沉积物移动, 或 landslide 的结果 <sup>[8-9, 20]</sup> 。
Mass wasting	包括滑坡体滑走后留下的凹坑(gullies)和滑坡体本身; 是斜坡物质损耗的总称 <sup>[35]</sup> 。
Slide	(1) 泛指 landslide <sup>[8]</sup> 。 (2) 是滑坡的一种类型, 指沉积物沿平坦滑动面的移动 <sup>[33]</sup> 。
Slump	(1) 指由于重力作用使未固结成岩的沉积物沿坡向下滑动, 泛指 landslide <sup>[2]</sup> 。 (2) 滑坡的一个类型, 指沉积物沿弯曲滑动面发生的旋转性移动 <sup>[33]</sup> 。

快速堆积、侵蚀作用、周期荷载、人类活动等原因被削弱<sup>[9]</sup>。

Booth 等<sup>[42]</sup>认为大陆边缘的滑坡源区主要有两类, 一类在开放的陆坡或陆隆上; 另一类来自海底峡谷和水道系统。开放陆坡的物源量比峡谷水道后壁和侧壁所能输送的物源量要大得多。由于开放陆坡的坡度一般小于 5°, 且低于风暴波浪基准面, 因此地震被认为是发生在陆坡上的滑坡最常见的触发机制<sup>[43]</sup>。而在海底峡谷区域, 滑坡的发生更可能是与水流的侵蚀作用有关<sup>[44-46]</sup>。

## 2 海底滑坡的分类

海底滑坡的分类方案大多沿用于陆地滑坡, 其中应用最广泛的是 Varnes 在 1958 年提出并在日后不断修改的陆地滑坡分类方案, 其主要依据是滑坡物质的种类和搬运方式<sup>[33, 47]</sup>(表 2)。该分类按搬运方式将滑坡分为崩落(fall)、倾倒(topple)、滑动(slide)、横向扩展(lateral spread)、流动(flow)及复合体(complex)。其中, 滑动又可以根据滑动面弯曲与否进一步划分为平移型滑动(translational slide)和旋转型滑动或

滑塌(rotational slide or slump)两种; 而流动型滑坡则包括碎屑流(debris flow)、碎屑崩流(debris avalanche)、土流(earth flow)、泥流(mud flow)和蠕动(creep)等 5 类。

随着调查手段精度的不断提高, 人们对海底滑坡的认识也逐渐加深, 海底滑坡的分类也在不断改进和细分。Dott<sup>[48]</sup>依据沉积物的分选情况、内部层理和结构的变化等, 将水下重力引起的沉积物搬运和沉积作用划分为 4 类, 分别是滑动、滑塌、碎屑流和浊流。Almagor 等<sup>[49]</sup>根据土壤力学(soil mechanics)将海底滑坡分为块状或平板状滑动、旋转滑塌、泥流、碎屑流和蠕动。Locat<sup>[50]</sup>认为, 海底滑坡的识别准则和分类标准应与陆地滑坡一致, 主张套用 ISSMGE 技术委员会提出的陆地滑坡分类方案<sup>[51]</sup>, 即根据移动方式将海底滑坡分为滑动、倾倒、扩展、崩落和流动, 这 5 种类型相互是独立的, 其中滑动可细分为平移滑动和旋转滑塌, 崩落和流动进一步转变细分为碎屑崩流、碎屑流和泥流, 而几乎所有基本型都可以进一步演变为浊流。Canals 等<sup>[8]</sup>利用“陆坡稳定计划”(the Continental Slope Stability project, 简称 COSTA)所提供的资料(高精度测深、深拖旁扫声纳、高分辨率 3D 地震反射资料等)将北大西洋陆坡上的海底滑坡划分为 5 类, 分别是蠕动、岩崩和碎屑崩流、平移滑动或滑坡、碎屑流、泥流 5 种类型。Lee 等<sup>[9]</sup>在 Varnes<sup>[47]</sup>的分类基础上, 提出了一个简化的海底滑坡分类方案, 将海底滑坡划分为滑动和块体流(即重力流)两大类型, 其中滑动可以细分为平移型和旋转型(滑塌), 块体流可细分为碎屑崩流、泥流、碎屑流、液化流和浊流。此外, 块体搬运复合体(mass transport complexes, 简称 MTCs)的概念也被广泛运用, 它通常指滑动、滑塌、碎屑流等(不包括

表 2 陆地滑坡分类<sup>[33]</sup>

搬运方式	滑坡物质类型		
	基岩	土壤	
		粗粒为主	细粒为主
崩落	岩崩	碎屑岩崩	土崩
倾倒	岩石型倾倒	碎屑型倾倒	土壤型倾倒
滑动	岩石型滑动	碎屑型滑动	土壤型滑动
	岩石型滑动	碎屑型滑动	土壤型滑动
横向扩张	岩石型扩张	碎屑型扩张	土壤型扩张
流动(包括蠕动)	岩流	碎屑流	土流
复合体	两种或两种以上的组合		

浊流)重力成因的沉积物集合体<sup>[52-53]</sup>。Moscardelli 等<sup>[20]</sup>出于强调滑坡机制、先期环境条件的考量,将重力搬运的沉积物分成块体搬运复合体和浊流沉积;并且综合地貌特征、滑坡规模、滑坡机制、滑坡源区位置等因素又将块体搬运复合体划分为依附型和独立型两大类型,其中依附型块体搬运复合体细分为陆架依附型和陆坡依附型,而独立型块体搬运复合体的源区主要位于泥火山、盐底辟、天然堤或者洋中脊的两侧。

在对不同海底滑坡分类进行研究的基础上,综合物质来源、滑动方式、搬运机制等,并且筛选掉不常见的滑坡方式,我们把海底滑坡归纳为以下 4 个基本类型,分别是蠕动、滑动、块体流和复合型滑坡。其中,滑动又可细分为平移型的滑动和旋转型的滑塌;块体流(重力流)主要指碎屑崩流、碎屑流和泥流;而复合型滑坡则是两个或两个以上滑坡的组合;以上基本滑坡类型最终均有可能转变为浊流(图 1)。各种基本滑坡类型的特征概述如下。

蠕动是指移动速度极度缓慢的滑坡,它是沉积物在一定外力作用下发生的缓慢的、持续的、长期不可逆转的变形,常发生于富含黏性沉积物的海底,并常伴生于滑动、块体流或复合型滑坡的头部。蠕动可能演变为滑动或塑性流,它的出现预示了滑坡发生的可能<sup>[8, 54]</sup>。

滑动强调滑坡体的整体移动和完整性。根据滑动面的形态,细分为平移型滑动(简称“滑动”)和旋转型滑动(简称“滑塌”)。平移型滑动指的是滑动面平直的滑坡现象,内部结构几乎不变形;旋转型滑动指沿弯曲的滑动面滑动并发生了不同程度旋转的滑坡体,其内部结果通常遭受不同程度的变形。

块体流指滑坡造成沉积物变形成类似于黏性流体的物质,其内部变形非常复杂,常发育有无数短小的或不可见的滑动面<sup>[55]</sup>。其中,碎屑流是非均质的,在细粒沉积物中裹挟有大的碎石;泥流主要含泥质;碎屑崩流中的碎块比滑动中的块体要小,速度非常迅速,搬运距离也很远,一般发生在开放陆坡上。

复合型滑坡有多个期次、多种滑坡类型复合而成。其成分及结构、构造最为复杂,不同期次或不同类型的滑坡可能存在复杂的交切和破坏关系。由于海底滑坡的规模一般比较大,沉积物的运移和演化较为复杂,复合型滑坡是相对而言最为常见的滑坡类型。

浊流则可能由各种滑坡演化而来,主要是向下移动的被稀释了的沉积物悬浮体,沉积物以紊流作为支撑机制。

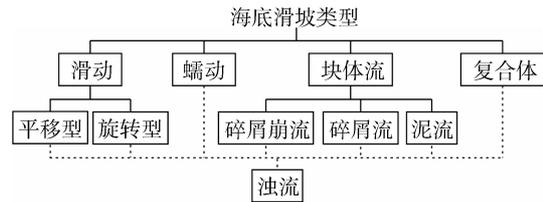


图 1 海底滑坡类型

### 3 海底滑坡的模式和结构单元

一般认为,海底滑坡与陆地滑坡在结构上是类似的,Cruden 和 Varnes<sup>[51]</sup>给出了一个典型的岩土块体滑动体的结构模式。他们这个理想的滑坡体包括两个区域:下陷区和堆积区。另有文献将下陷区再细分为上部滑坡源区和中部滑移区<sup>[10]</sup>。理想滑坡体的主要结构单元及其特征归纳为表 3 所示。

表 3 滑坡体的主要结构单元及其特征

区域	结构单元	特征
下陷区	主陡壁	滑移体滑走后在未被扰动的地层上留下的一个陡峭面或断崖
	次级陡壁	滑移体在移动过程中所形成的次生陡峭面或断崖,一般发育于滑坡体的头部区域
	冠部	位于主陡壁逆坡一侧且毗邻主陡壁的未发生位移的部分
	头部	滑移体与主陡壁接触的部分
	滑坡主体	指在滑动面之上介于主陡壁与滑动面趾部之间的那部分滑移体
滑动面相关	滑动面(失稳面)	滑坡体失稳发生破坏和向下移动的起始面
	滑动面趾部	滑动面下倾方向的最末端,位于被破坏区域和滑动面之间
	分隔面	滑坡体滑移到原始地表面上时,滑移体与未扰动地层之间的分界面
堆积区	趾部	滑出滑动面之外的位于滑坡体最末端的部分,通常有弯曲变形的边缘
	挤压脊	滑坡体趾部区由于挤压作用而形成的横向脊

随着多波束测深、3D地震勘探技术等在海底范围内广泛应用,海底滑坡体的结构单元得到更精细的划分和描述。Bull等<sup>[34]</sup>(图2)将滑坡体划分成后壁区、输送区和趾部区3个部分。其中揭示滑坡运动学过程的各指示因子分别为:滑坡陡壁(headwall scarp), 延展脊和断块, 侧壁, 底面剪切滑动形

成的断坪, 底部剪切滑动面上的沟槽, 逸出块体的擦痕, 滑坡体内残余块体, 滑移块体, 逸出块体(outrunner blocks), 褶皱, ①纵向剪切或一级流动组, ②二级流动组, ③挤压脊, ④褶皱和逆冲断层系统。事实上, 这些运动学指示因子就是组成海底滑坡体的主要结构单元。

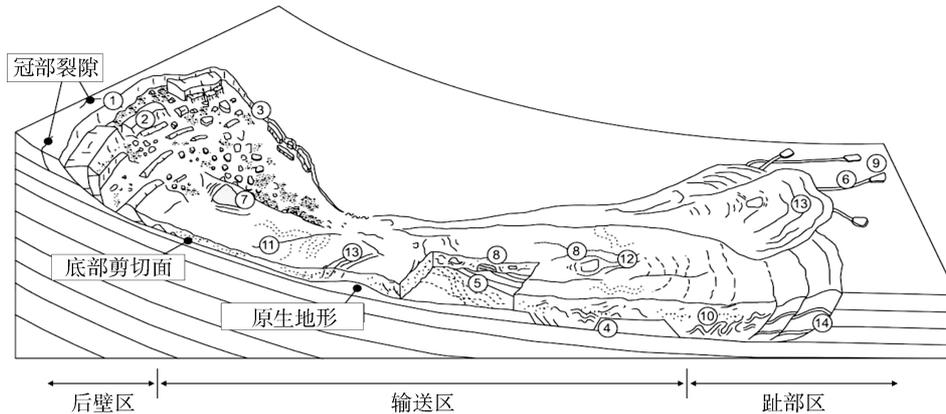


图2 海底滑坡复合体的结构及其运动学指示因子示意图<sup>[34]</sup>

## 4 海底滑坡的反射地震识别

海底滑坡体的识别仅靠沉积组分是不够的。目前,人们主要通过高分辨率地震及多波束测深等地球物理资料对海底滑坡体进行识别和描述。文献中识别海底滑坡时所使用的标志主要有:滑坡陡壁包括后壁(headscarp/headwall)和侧壁(sidewall),滑动面(rupture/failure/slide surface)和滑移体(displaced mass)<sup>[1, 8, 10, 34, 56-59]</sup>,其中后壁和侧壁合围在一起可以统称为滑坡断崖(scar)。

在文献调研基础上,我们对海底滑坡在反射地震资料中的识别标志进行了总结,反射地震资料上能够揭示的滑坡的结构标志主要有:主陡壁(后壁和侧壁)、次级陡壁、蠕动构造、滑动面、杂乱的滑坡主体、铲状断层和旋转断块、内部残余块体、褶皱和逆冲断层等。以下分别从反射地震剖面和3D地震属性切片两部分对这些地震识别标志进行描述。

### 4.1 二维剖面识别标志

#### 4.1.1 滑坡陡壁及冠部蠕动构造

主陡壁(后壁)是滑坡体发生滑移后留下的陡崖,它是在拉张应力下破裂形成的,一个滑坡区内一般有一个主陡壁。主陡壁的坡度较陡,多在 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ <sup>[34]</sup>。平面上看,其外形通常呈环状或拱形,亦可呈波状或直线形<sup>[8]</sup>。从反射剖面上看,被埋藏的主陡壁通常

是未被变形破坏的反射波组与变形严重甚至成杂乱状的反射波组之间的明显界面,现代海底滑坡的主陡壁则是暴露于海底的强反射界面(图3)。McAdoo等<sup>[1]</sup>认为,是否有拱形陡壁的存在是区分海底滑坡与峡谷水道或其他削蚀地貌的一个重要依据。断崖(后壁和侧壁)围成的区域就是滑坡的源区,断崖的长度从数十千米到几十米不等,高度从几百米到几十米甚至更低之间变化,与滑坡发生前原地沉积物的厚度及软弱程度等因素有关<sup>[8]</sup>。值得注意的是,主陡壁经常被后续滑坡事件等削蚀或破坏,从而导致主陡壁的长度、高度和倾角等不再代表原始滑坡时的数值<sup>[60]</sup>。而侧壁的识别则有着一定局限性,因为其特征是越靠近下坡即堆积区时边界越不明显。

次级陡壁是在主陡壁形成之后才产生的。冠部地层在滑坡主陡壁形成之后由于向下坡的应力作用再次失稳,新的陡壁将加深或切割原来的陡壁,这种上坡位置的次级陡壁通常解释为滑坡后退式发展的结果。要结束后退式滑坡的进程可以是持续滑坡后退直到最后的陡壁被削平或者由于特殊地质事件被迫停止<sup>[8]</sup>。次级陡壁在主陡壁之下的情况也不少见,通常由于突然的应力荷载或底部拖拽阻力造成<sup>[61]</sup>。次级陡壁的地貌外形与主陡壁一样也是以半圆形为主;其反射地震特征较之主陡壁可能不那么明显,它的存在使滑坡冠部或者头部的反射波组呈现阶梯

状或坎块(图 3)。

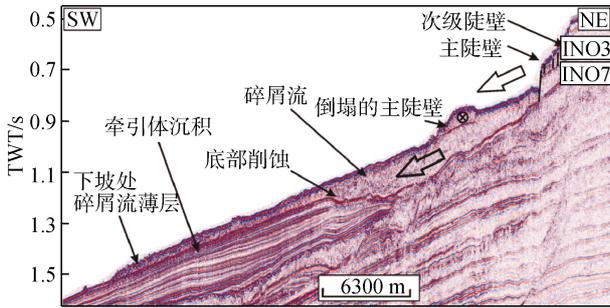


图 3 挪威大陆边缘中段 Storegga 滑坡体的二维地震反射剖面<sup>[21]</sup>  
TWT 代表双程旅行时

滑坡体的冠部可能发育蠕构造, 它们是波脊规律不明显的波状反射结构<sup>[62]</sup>。蠕构造可以认为是次级陡壁的缓慢变形状态, 具有后退式特性<sup>[63]</sup>。这种结构可以很复杂并且变形严重, 也可能刚开始发育而呈轻微的扭转状态, 通常振幅较弱。

#### 4.1.2 滑动面

滑动面是滑坡发生的起始面, 滑动面以下地层未被扰动, 而之上的滑坡体则发生不同程度的变形。一般情况下, 滑动面上是沉积物最薄弱的地带。在地震剖面上, 滑动面一般表现为发育有明显削蚀特征的强振幅反射界面, 与其上下地层波阻抗差异较大, 且地层产状存在差异等有关(图 3~图 5)。滑动面的形态可以是平面状的、弯曲的或弧形的, 还可以是台阶状的。滑动面可以顺层分布, 表现为断坪(flat); 也可以切割地层, 表现为断坡(ramp)<sup>[34]</sup>。断坪和断坡交替

出现, 形成阶梯状滑动面(图 4)。在后退式滑坡中, 穿层现象倾向于发生在头部<sup>[56]</sup>。

#### 4.1.3 滑移体

滑移体就是位于滑动面及分隔面之上, 离开陡壁的滑坡沉积体。在地震剖面上, 滑移体内部常表现为变形层状、波状、均一块状或杂乱地震相。平移型滑动反射层的变形并不显著且几乎是连续的, 而旋转型滑塌的变形程度则相对严重一些; 块状流型滑体内部反射同相轴则有无数小的中断或者变形, 甚至呈半透明状; 块状或杂乱地震相常见于大型滑坡体的头部(源区)和趾部(堆积区)<sup>[64]</sup>。均一或杂乱的弱振幅地震相与周围强振幅平行相之间的对比, 及其不规则的上表面的反射地震特征, 是识别埋藏的古滑坡体最主要的标志之一<sup>[65]</sup>。

滑移体离开陡壁后在摩擦阻力和其他应力作用下继续破碎分离, 形成旋转或者平移的断块, 这些断块和其他滑坡物质铺展在滑动面上体现在地震剖面上就是一系列铲状正断层。被分离断块内部结构几乎未被扰动、反射同相轴连续, 被铲状正断层依序夹在中间, 与滑坡陡壁比邻却隔开。铲状正断层亦可看成是位于主陡壁下部的次级陡壁, 它们和旋转断块一起是滑移体头部张性变形的标志。

滑坡体内部有时并不是所有沉积体都卷入滑坡移动中, 部分留在原地的沉积物与周围滑坡物质形成鲜明对比<sup>[66]</sup>。其反射同相轴连续且振幅一般较强, 残余块体的底部与滑动面之间没有分离(图 5)。一定程度上, 内部残余块体是由小型断坪构成。

在趾部区, 滑坡物质的动能逐渐减小, 沉积物

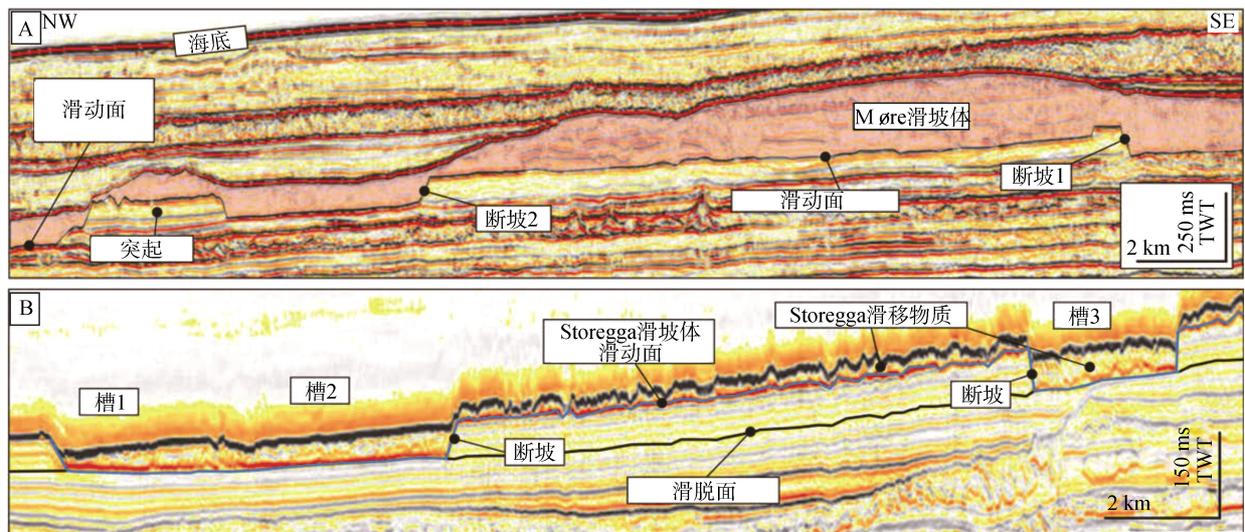


图 4 坡坪式滑动面的地震反射特征<sup>[34]</sup>

A.Møre 滑坡体底部坡坪式滑动面; B.Storegga 滑坡体底部坡坪式滑动面及滑脱面

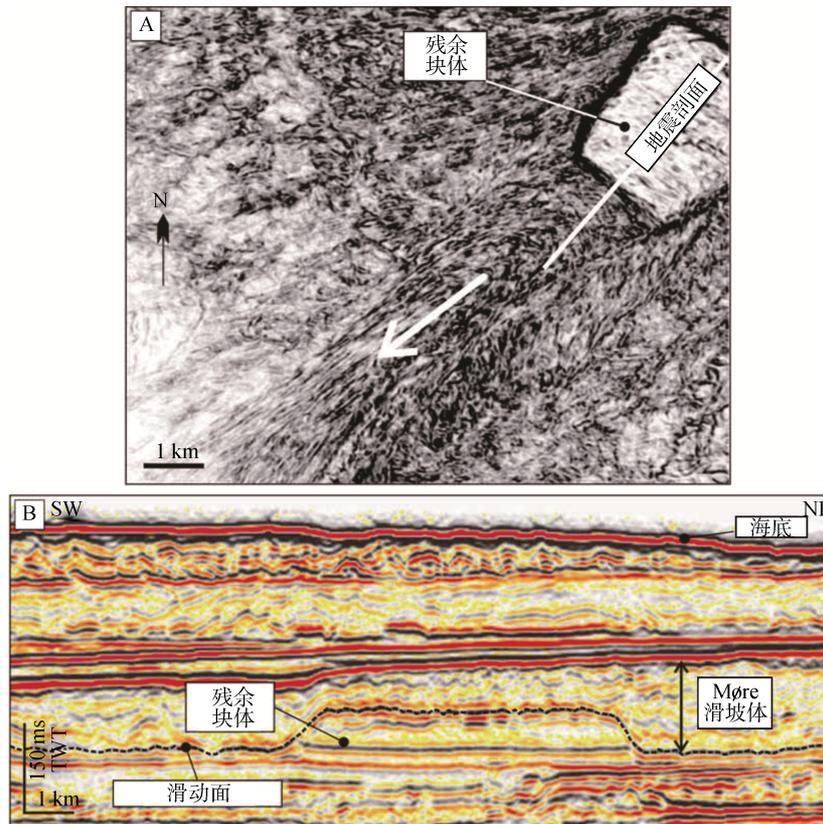


图5 滑坡体中残余块体的地震反射特征<sup>[34]</sup>

A. Møre 滑坡体的相干切片, 箭头指示滑移方向; B. 包含残余块体的二维地震剖面, 位置见图 5A

滑移过程中的挤压作用和来自下伏未扰动地层的摩擦阻力, 使得此处常常形成一些褶皱及伴生的逆冲断层。

#### 4.2 三维属性切片识别标志

虽然海底滑坡体的各种形貌特征在二维反射地震剖面上能够引起各种各样的反射, 在一定程度上能够帮助我们识别和判断海底滑坡的存在, 但是在平面上识别出滑坡体的位置、形状及产状特征, 并圈定其分布范围, 对于海底滑坡的研究至关重要。近年来, 随着海上 3D 地震数据的积累, 采用地震属性、切片等技术及地震地貌学分析方法研究海底滑坡的实例逐渐增多。直接利用地震资料的时间参数可以获得等时间构造图或等厚图等<sup>[19-20, 34, 67]</sup>; 而目前在滑坡体识别中最常使用的地震属性有振幅类属性(如均方根振幅)、相干属性及几何属性(如梯度等)<sup>[19-20, 34, 67-68]</sup>(图 6)。从平面属性切片图上看, 滑坡体的各个要素一般都较易辨别。此外, 三维地震数据体兼有二维剖面解释与高精度的三维地震属性和切片综合分析的优势, 在海底滑坡研究中具有良好的应用前景。

## 5 总结与展望

海底滑坡是指由于环境负载和抗剪强度的变化引起的海底斜坡上的岩块或沉积物在重力作用下沿剪切破坏面向下移动的过程及其形成的沉积体的总称。海底滑坡按照物质类型和移动方式主要分为蠕动、滑动(包括平移型滑动和旋转型滑塌)、块体流(包括碎屑崩流、碎屑流和泥流)和复合型滑坡 4 大类, 其中复合型滑坡最为常见。

反射地震是海底滑坡研究的重要工具。在地震剖面上, 滑坡体的识别的关键是辨认滑坡体的关键地貌要素, 包括陡壁、滑动面和滑移的沉积物块体或岩块。滑坡陡壁包括主陡壁和次级陡壁, 它们外形类似, 主陡壁一般最长最高最陡, 主陡壁之上的次级陡壁显示出后退式滑坡的特性, 黏性沉积物中次级陡壁可能发展成蠕动构造预示着新的滑坡可能性; 滑动面区别于上覆变形或杂乱相地层与下伏未被破坏地层, 显示为强反射波阻抗界面, 其形态可以是平面状的、弯曲的或弧形的, 还可以是台阶状的; 滑移体内部表现为变形层状、波状、均一块状或杂乱

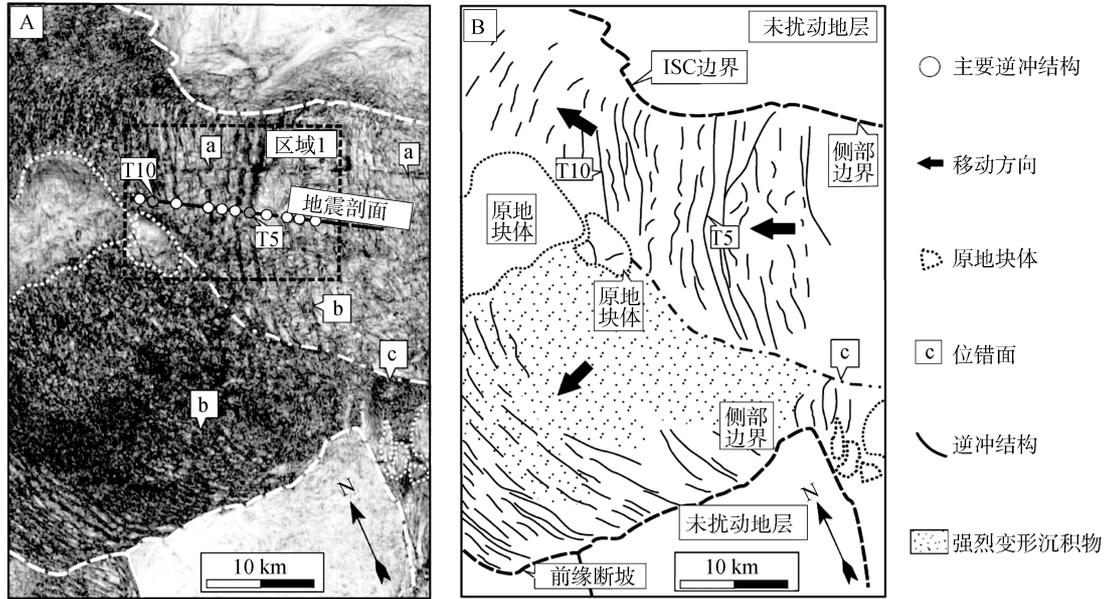


图6 以色列-滑坡复合体(ISC)趾部区<sup>[68]</sup>

A. 相干地层切片; B. 对相干切片的解释; a. 是地震处理假象; b. 是逆冲断层的平面形态

相特征, 其头部的铲状断层和旋转断块, 即主陡壁之下的次级陡壁组, 指示拉张特性, 而趾部的褶皱和逆冲断层指示的是挤压特性。

我国海底滑坡的研究虽然还处于初步发展阶段, 但是资料采集和地球物理方法的运用已趋国际前缘, 因此学习国外研究方法、充分利用最新高精度资料、积累和完善对本国海底滑坡成熟的认识是重中之重, 也是未来目标。在技术方法上, 在二维反射地震剖面上进行海底滑坡的识别已经有了系统的研究和总结, 但是考虑到未来三维地震数据的采集将成为常态, 而且既能从剖面上又能从高精度的属性切片或平面地貌图上对海底滑坡进行识别和精细分析, 再加上其在空间可视化上的优势, 使其在海底滑坡研究中具有良好的应用前景。在科学上, 海底滑坡作为一种重要的深水沉积类型, 它们与底流、浊流之间相互作用的机理有待深入研究; 作为一种重要的海底地貌类型, 它们与海底峡谷、海底扇、沉积牵引体等之间的成因联系也是值得深入探讨的课题。

#### 参考文献:

[1] McAdoo B G, Pratson L F, Orange D L. Submarine landslide geomorphology, US continental slope[J]. Marine Geology, 2000, 169: 103-136.  
[2] Fairbridge R W. Submarine slumping and location of oil bodies[J]. Bulletin of The American Association OP

petroleum Geologists, 1946, 30 (1): 84-92.

[3] Mienert J, Berndt C, Laberg J S, et al. Slope instability of Continental Margins[C]//Wefer G, Billet D S M, Hebbeln D, et al. Ocean margin systems. New York: Springer, 2002: 179-193.  
[4] Kayen R E, Lee H J. Pleistocene slope instability of gas hydrate-laden sediment on the Beaufort Sea margin[J]. Marine Geo-Technology, 1991, 10: 125-141.  
[5] Sultan N, Cochonat P, Foucher J P, et al. Effect of gas hydrates dissociation on seafloor slope stability[C]//Locat J, Mienert J. Submarine Mass Movements and their Consequences. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003: 103-111.  
[6] Bryn P, Berg K, Forsberg C F, et al. Explaining the Storegga slide[J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22: 11-19.  
[7] Lee H J. Timing of occurrence of large submarine landslides on the Atlantic Ocean margin[J]. Marine Geology, 2009, 264: 53-64.  
[8] Canals M, Lastras G, Urgeles R, et al. Slope failure dynamics and impacts from sea floor and shallow sub-sea floor geophysical data: case studies from the COSTA project[J]. Marine Geology, 2004, 213: 9-72.  
[9] Lee H J, Locat J, Desgagnés P, et al. Submarine mass movements on continental margins[C]//Nittrouer C A,

- Austin J A, Field M E, et al. Continental Margin Sedimentation: From Sediment Transport to Sequence Stratigraphy. IAS Spec. Publ., 37. United Kingdom: Blackwell Publishing, 2007: 213-274.
- [10] Hampton M A, Lee H J, Locat J. Submarine landslides[J]. Reviews of Geophysics, 1996, 34 (1): 33-59.
- [11] Dingle R V. The anatomy of a large submarine slump on a sheared continental margin (SE Africa)[J]. Journal of the Geological Society, 1977, 134: 293-310.
- [12] Shepard F P. Depth changes in Sagami Bay during the great Japanese earthquake[J]. J Geol, 1933, 41: 527-536.
- [13] Heezen B C, Ewing M. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks earthquake[J]. Am J Sci, 1952, 250: 849-873.
- [14] Moore J G, Clague D A, Holcomb R T, et al. Prodigious submarine landslides on the Hawaiian Ridge[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94: 17645-17484.
- [15] Haflidason H, Sejrup H P, Nygård A, et al. The Storegga Slide: architecture, geometry and slide development[J]. Marine Geology, 2004, 213: 201-234.
- [16] Nakajima T, Satoh M, Okamura Y, et al. Channel-levee complexes, terminal deep-sea fan and sediment wave fields associated with the Toyama Deep-Sea Channel system in the Japan Sea[J]. Marine Geology, 1998, 147: 25-41.
- [17] Normark W R, Piper D J W, Posamentier H, et al. Variability in form and growth of sediment waves on turbidite channel levees[J]. Marine Geology, 2002, 192: 23-58.
- [18] Frey-Martínez J, Cartwright J, James D. Frontally confined versus frontally emergent submarine landslides: A 3D seismic characterization[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23: 585-604.
- [19] Moscardelli L, Wood L, Mann P. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90: 1059-1088.
- [20] Moscardelli L, Wood L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad[J]. Basin Research, 2008, 20: 73-98.
- [21] Micallef A, Masson D G, Berndt C, et al. Development and mass movement processes of the north-eastern Storegga Slide[J]. Quaternary Science Reviews, 2009: 433-448.
- [22] 寇养琦. 南海北部的海底滑坡[J]. 海洋与海岸带开发, 1990, 7(3): 48-51.
- [23] 冯文科, 石要红. 南海北部外陆架和上陆坡海底滑坡稳定性研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(2): 81-94.
- [24] 宋海斌. 天然气水合物体系动态演化研究( ) : 海底滑坡[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 503-511.
- [25] 吴时国, 陈珊珊, 王志君, 等. 大陆边缘深水海底滑坡及其不稳定性风险评估[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 430-437.
- [26] 孙运宝, 吴时国, 王志君, 等. 南海北部白云大型海底滑坡的几何形态与变形特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 69-76.
- [27] 王大伟, 吴时国, 秦志亮, 等. 南海陆坡大型块体搬运体系的结构与识别特征[J]. 海洋地质与第四季地质, 2009, 29(5): 65-71.
- [28] 胡光海. 东海陆坡海底滑坡识别及致滑因素影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [29] 刘锋, 吴时国, 孙运宝. 南海北部陆坡水合物分解引起海底不稳定性的定量分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 946-953.
- [30] 吴时国, 秦志亮, 王大伟, 等. 南海北部陆坡块体搬运沉积体系的地震响应与成因机制[J]. 地球物理学报, 2011, 54(12): 3184-3195.
- [31] 王大伟, 吴时国, 吕福亮, 等. 南海深水块体搬运沉积体系及其油气勘探意义[J]. 中国石油大学学报, 2011, 35(5): 14-19.
- [32] He Ye, Zhong Guangfa, Wang Liaoliang, et al. Characteristics and occurrence of submarine canyon-associated landslides in the middle of the northern continental slope, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 57: 546-560.
- [33] Varnes D J. Slope movement types and processes[C]// Schuster R L, Krizek R J. Landslides-Analysis and control: National Research Council, Special Report 176. Washington D C: Transportation Research Board, 1978:

- 11-33.
- [34] Bull S, Cartwright J, Huuse M. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 1132-1151.
- [35] Greene H G, Maher N M, Paull C K. Physiography of the Monterey Bay National Marine Sanctuary and implications about continental margin development[J]. *Marine Geology*, 2002, 181: 55-82.
- [36] Prior D B, Wiseman W J, Gilbert R. Submarine slope processes on a fan delta, Howe Sound, British Columbia[J]. *Geo-Mar Lett*, 1981, 1: 85-90.
- [37] Prior D B, Bornhold B D, Coleman J M, et al. Morphology of a submarine slide, Kitimat Arm, British Columbia[J]. *Geology*, 1982, 10: 588-592.
- [38] Field M E, Gardner J V, Jennings A E, et al. Earthquake-induced sediment failures on a 0.25° slope, Klamath River delta, California[J]. *Geology*, 1982, 10: 542-546.
- [39] Milne J. Sub-Oceanic Changes[J]. *The Geographical Journal*, 1897, 10 (2): 129-146.
- [40] Carlson P R. Holocene slump on continental shelf off Malaspina Glacier, Gulf of Alaska[J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62: 2412-2426.
- [41] Prior D B, Coleman J M. Disintegrative retrogressive landslides on very-low-angle subaqueous lobes, Mississippi delta[J]. *Marine Geotechnology*, 1978, 3: 37-60.
- [42] Booth J S, O'Leary D W, Popenoe P, et al. US Atlantic continental slope landslides; their distribution, general attributes, and implications[C]//Schwab W C, Lee H J, Twichell D C. Selected studies in the US Exclusive Economic Zone. US: USGS Publications, 1993: 14-22.
- [43] Lee H J, Schwab W C, Booth J S. Submarine landslides: an introduction[C]//Schwab W C, Lee H J, Twichell D C. Submarine Landslides: Selected Studies in the US Exclusive Economic Zone. US: USGS Publications, 1993: 158-166.
- [44] Farre J A, McGregor B A, Ryan W B F, et al. Breaching the shelfbreak passage from youthful to mature phase in submarine canyon evolution[J]. *SEPM Special Publication*, 1983, 33: 25-39.
- [45] Pratson L F, Ryan W B F, Mountain G S, et al. Submarine-canyon initiation by downslope-eroding sediment flows: evidence in late Cenozoic strata on the New-Jersey continental-slope[J]. *Geological Society of America Bulletin* 106, 1994: 395-412.
- [46] Pratson L F, Coakley B J. A model for the headward erosion of submarine canyons induced by downslope-eroding sediment flows[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1996, 108: 225-234.
- [47] Varnes D J. Landslide types and processes[C]//Eckel E D. Landslides and Engineering Practice, Special Report 29. Washington D C: Highway Research Board, 1958: 20-47.
- [48] Dott R H. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes[J]. *AAPG Bull*, 1963, 47 (1): 104-128.
- [49] Almador G, Garfunkel Z. Submarine slumping in continental margin of Israel and Northern Sinai[J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1979, 63 (3): 324-340.
- [50] Locat J. Instabilities along ocean margins: a geomorphological and geotechnical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 503-512.
- [51] Cruden D M, Varnes D J. Landslide type and processes[C]. Turner A K, Shuster R L. *Landslide Investigation and Mitigation*. Washington D C: Natl. Acad. Press, 1996: 36-75.
- [52] Weimer P. Sequence Stratigraphy of the Mississippi Fan (Plio-Pleistocene), Gulf of Mexico[J]. *Geo-Marine Letters*, 1989, 9: 185-272.
- [53] Weimer P, Slatt R M. Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Settings[M]. Tulsa: SEPM Special Publication, 2007: 427-464.
- [54] Lee H J, Syvitski J P M, Parker G, et al. Distinguishing sediment waves from slope failure deposits: field examples, including the "Humboldt slide", and modelling results[J]. *Mar Geol*, 2002, 192: 79-104.
- [55] Hampton M. The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents[J]. *J Sediment Petrol*, 1972, 42: 775-993.
- [56] Solheim A K, Berg K, Forsberg C F, et al. The Storegga

- Slide complex: repetitive large scale sliding with similar cause and development[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22: 97-107.
- [57] Green A, Uken R. Submarine landsliding and canyon evolution on the northern KwaZulu-Natal continental shelf, South Africa, SW Indian Ocean[J]. *Marine Geology*, 2008, 254: 152-170.
- [58] Chaytor J D, ten Brink U S, Solow A R, et al. Size distribution of submarine landslides along the U.S. Atlantic margin[J]. *Marine Geology*, 2009, 264: 16-27.
- [59] Puga-Bernabéu Á, Webster J M, Beaman R J, et al. Morphology and controls on the evolution of a mixed carbonate-siliciclastic submarine canyon system, Great Barrier Reef margin, north-eastern Australia[J]. *Marine Geology*, 2011, 289: 100-116.
- [60] Gee M J R, Gawthorpe R L, Friedmann S J. Triggering and evolution of a giant landslide, offshore Angola revealed by 3D seismic stratigraphy and geomorphology[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76: 9-19.
- [61] Lastras G, Canals M, Hughes-Clarke J E, et al. Seafloor imagery of the BIG'95 debris flow, Western Mediterranean[J]. *Geology*, 2002, 30 (10): 871-874.
- [62] Mulder T, Cochonat P. Classification of offshore mass movements[J]. *J Sediment Res*, 1996, 66 (1): 43-57.
- [63] Lastras G, Canals M, Urgeles R. Lessons from sea-floor and subsea-floor imagery of the BIG'95 debris flow scar and deposit[C]//Locat J, Mienert J. *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. The Netherlands: Kluwer Acad Publ, 2003: 425-431.
- [64] Berndt C, Costa S, Canals M, et al. Repeated slope failure linked to fluid migration: The Ana submarine landslide complex, Eivissa Channel, Western Mediterranean Sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 319-320: 65-74.
- [65] Fisher M A, Normark W R, Grenne H G, et al. Geology and tsunamigenic potential of submarine landslides in Santa Barbara Channel, Southern California[J]. *Marine Geology*, 2005, 224: 1-22.
- [66] Frey-Martínez J, Cartwright J, Hall B. 3D seismic interpretation of slump complexes: examples from the continental margin of Israel[J]. *Basin Research*, 2005, 17: 83-108.
- [67] Gee M J R, Uy H S, Warren J, et al. The Brunei slide: A giant submarine landslide on the North West Borneo Margin revealed by 3D seismic data[J]. *Marine Geology*, 2007, 246: 9-23.
- [68] Frey-Martínez J, Cartwright J, James D. Frontally confined versus frontally emergent submarine landslides: A 3D seismic characterization[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23: 585-604.

(本文编辑: 刘珊珊)