

海底滑坡动力侵蚀机理研究：回顾与展望

殷跃平, 王文沛, 邢爱国, 黄波林, 李 滨, 韩雷岩, 金少强, 杨 勇, 张晨阳

Research on dynamic erosion mechanism of submarine landslide: Review and prospects

YIN Yueping, WANG Wenpei, XING Aiguo, HUANG Bolin, LI Bin, HAN Leiyan, JIN Shaoqiang, YANG Yong, and ZHANG Chenyang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202502015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

贵州都匀马达岭滑坡碎屑流动力演化过程分析

Analysis of the dynamic fragmentation process of debris flow in the Madaling landslide in Duyun, Guizhou

马杰, 张耀明, 于文罡, 王春玲, 张国锋, 何君毅 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 42-49

雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析

Numerical runout modeling and dynamic analysis of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet

李昆仲, 张明哲, 邢爱国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 18-27

黄土地震滑坡研究综述与展望

A review of earthquake-induced loess landslides research and future prospects

钱法桥, 邓亚虹, 刘凡, 门欢 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 5-20

高位远程地质灾害研究：回顾与展望

Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects

殷跃平, 高少华 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 1-18

斜坡降雨侵蚀破坏机理现场试验研究

Analysis of slope erosion and failure mechanism under rainfall conditions based on field experiments: A case study of the residual slope of landslide and debris flow in Hexiluo gully, Ganluo County, Sichuan Province

吕霞, 范刚, 刘大瑞, 林子钰 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(6): 82-89

四川木里县项脚沟“75”特大型泥石流特征及发展趋势分析

Analysis of the characteristics and development trends of the “75” catastrophic debris flow in Xiangjiao gully, Muli County, Sichuan

杨华铨, 柳金峰, 孙昊, 赵万玉, 张文涛 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 100-107



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202502015

殷跃平, 王文沛, 邢爱国, 等. 海底滑坡动力侵蚀机理研究: 回顾与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 1-15.

YIN Yueping, WANG Wenpei, XING Aiguo, et al. Research on dynamic erosion mechanism of submarine landslide: Review and prospects[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(1): 1-15.

海底滑坡动力侵蚀机理研究: 回顾与展望

殷跃平¹, 王文沛¹, 邢爱国², 黄波林³, 李 滨⁴, 韩雷岩⁵, 金少强^{5,6}, 杨 勇⁷, 张晨阳⁸

(1. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害防治技术指导中心), 北京 100081; 2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 3. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002; 4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 5. 中国三峡新能源(集团)股份有限公司, 北京 101199; 6. 三峡新能源海上风电运维江苏有限公司, 江苏盐城 224008; 7. 南京工业大学土木工程学院, 江苏南京 211816; 8. 香港理工大学土木及环境工程学系, 香港 999077)

摘要:海底滑坡会对海上风电、海底光缆、海洋平台等基础设施造成严重破坏,给“建设海洋强国”重大战略和保障海洋工程地质安全带来了严峻挑战。文章系统回顾了海底滑坡浊流地质灾害的研究历程,总结了国内外关于海底滑坡浊流链动特征、动力侵蚀类型、触发-演化-运移-侵蚀沉积机制、侵蚀理论模型及其对海底隆起、峡谷、盆地等复杂地貌的影响,提出了定量、多相、全过程、侵蚀-流态转化耦合的海底滑坡浊流动力侵蚀研究思路。最后,针对海上风电、海洋资源开发、海洋交通运输、海洋工程装备等重大工程的规划建设,展望了海底滑坡浊流基底易蚀结构地质模型和判识技术、滑坡-碎屑流-浊流灾害链复合、叠合及异构等全过程动力侵蚀力学模型及边界层动力侵蚀防控理论技术问题的研究方向。

关键词:海底滑坡; 浊流; 碎屑流; 超临界流; 动力侵蚀; 防治

中图分类号: P767; P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)01-0001-15

Research on dynamic erosion mechanism of submarine landslide: Review and prospects

YIN Yueping¹, WANG Wenpei¹, XING Aiguo², HUANG Bolin³, LI Bin⁴, HAN Leiyan⁵, JIN Shaoqiang^{5,6},
YANG Yong⁷, ZHANG Chenyang⁸

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazards, MNR), Beijing 100081, China; 2. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 5. China Three Gorges Renewables (Group) Co. Ltd., Beijing 101199, China; 6. CTG Offshore Wind Power Maintenance Jiangsu Co. Ltd., Yancheng, Jiangsu 224008, China; 7. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China; 8. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The geological hazards of submarine landslides can cause serious damage to infrastructure such as offshore wind

收稿日期: 2025-02-04; 修订日期: 2025-02-11

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004301); 甘肃省联合科研基金项目(24JRRA800)

第一作者: 殷跃平(1960—),男,贵州独山人,中国工程院院士,研究员,从事地质灾害防治与研究工作。

E-mail: yyueping@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 王文沛(1985—),男,江苏扬中人,土木工程专业,博士,正高级工程师,主要从事地质灾害防治工作。

E-mail: jcywangwenpei@mail.cgs.gov.cn

power, submarine optical cables, and marine platforms, posing a serious challenge to the major strategic task of building a maritime power and ensuring the geological safety of marine engineering. The article systematically reviews the research process of submarine landslide turbidity current geological hazards, summarizes the dynamic characteristics of submarine landslide-turbidity flow chain, dynamic erosion types, mechanisms of triggering, evolution, migration, erosion and sedimentation, theoretical models of erosion, and the influence of complex landforms such as uplift, canyons, and basins. A novel dynamic erosion approach is put forward of submarine landslide-turbidity flow chain, including quantitative, multiphase, whole process, erosion flow-state transformation. Finally, in view of the development of major projects such as offshore wind power, marine resource development, marine transportation, and marine engineering equipment, the geological model and identification technology are discussed of the erosion-prone structure of submarine landslide landslide-turbidity flow chain, as well as the composite, overlapping, and heterogeneous dynamic erosion mechanic model of the disaster chain, and the issues of prevention and control of boundary layer dynamic erosion.

Keywords: submarine landslide; turbidity flow; debris flow; supercritical flow; dynamic erosion; prevention and control

0 引言

广义的滑坡(landslide)是指由于重力或其他外界因素作用下发生顺坡运动的岩土体^[1-5], 不仅包括陆地滑坡、碎屑流、泥石流, 还包括如海洋滑坡、泥流、浊流等水下重力流(gravity flow)或称之为密度流(density flow)、质量流(mass flow)^[6]。本文论述的海底滑坡

(submarine landslide), 是指常发育于近海三角洲、大陆架斜坡、大陆坡及深海盆地的滑坡, 在远程运动过程中转化成碎屑流(avalanch /sturzstrom)或泥石流(debris flow), 进而转化为浊流(turbidity flow), 是一种公认极具破坏力的复合型地质灾害(图 1)。例如 1929 年加拿大纽芬兰 Grand Banks 海底滑坡, 滑动了约 850 km, 最高速度达到 19 m/s, 并导致 27 人死亡^[7]。

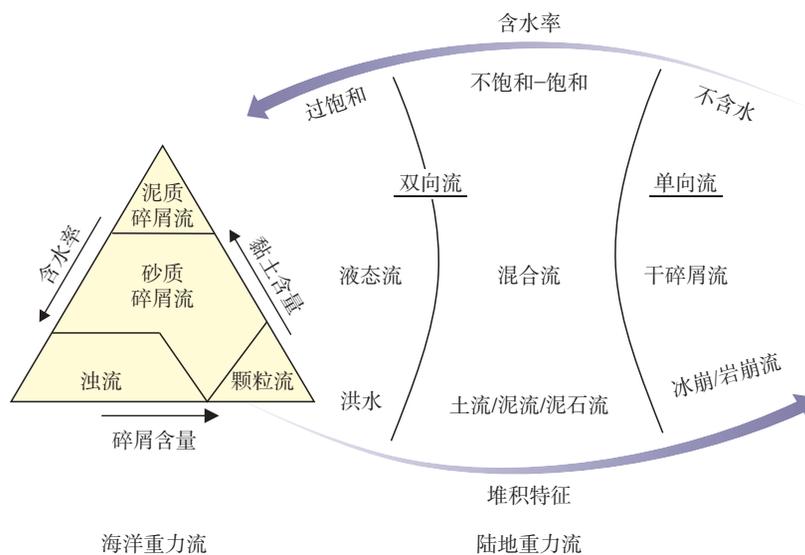


图 1 广义滑坡分类^[3-5]

Fig. 1 Classification of landslides^[3-5]

海底滑坡的规模一般远超陆地滑坡, 有时规模甚至是万亿立方米以上, 运动距离可达数百至数千千米以上, 面积最大可以达到数千至数万平方千米, 规模极巨大, 且常伴有巨灾海啸^[8-9]。2018 年印尼 Krakatau 火山喷发诱发海底滑坡, 继而触发海啸, 造成近 2 000 人伤亡。当地幸存者听到从海底传出来异常的声音。有专

家形容此次海底滑坡仿佛是“猛然把一个沙袋丢进装满水的浴缸里”。此外, 近年来中、小型浅层滑坡引发海底光缆系统、钻井平台等海洋工程设施破坏事件屡见不鲜, 如 2006 年台湾省恒春 7.2 级地震中多条国际海底通信光缆发生中断, 通过海缆依次断裂情况, 推算出此时海底重力流速度达到 20 m/s^[10-11]。

需要注意的是,水深大于 1 000 m 的深海海底滑坡易形成区域性的块体搬运沉积体系(mass transport deposits, MTDs),导致浅地层结构受到破坏,极大地破坏和改造了原生沉积系统^[12-13]。目前已知世界上最大规模的海底滑坡是发生在约 8.1 ka 前的挪威大陆边缘 Storegga 海底滑坡,体积达到了 $3.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,运动距离超 800 km,并引起北大西洋大范围的海啸过程,运动路径平均坡度仅为 $0.6^\circ \sim 0.7^\circ$ ^[14-15]。另一个较为著名的是发生在约 60 ka 前的摩洛哥 Agadir 海底峡谷“Bed 5”滑坡重力流灾害,运动距离超过 2 000 km。滑坡体积初始约 $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3$,通过极端侵蚀沿途沉积物,最终演变成体积约 $1.62 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的超大规模超远距离巨型流动体(giant flow),体积放大超过 100 倍。而 2022 年汤加 Hunga 火山爆发时形成的重力流是目前已知最大速度的浊流,速度高达约 34 m/s。我国南海白云海底滑坡流经大陆架、陆坡和深海平原多种地形,坡度变化较大(坡度 $1.0^\circ \sim 14.5^\circ$),最终体积超过 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[16]。Blasio 等^[17]曾指出海底滑坡的滑前与滑后落差与距离比值(能量线与水平面正切值)可低至 $0.01 \sim 0.05$ 。

相比而言,陆地上已知的运动距离最大的是 300 ka 前美国 Mount Shasta 滑坡碎屑流,运动距离约 43 km,虽然也是超远距离(>5 km)滑坡,但仍远不如海底滑坡^[18-19]。Hance^[20]统计了 434 个海底滑坡事件,超过 100 km 的就占了 10%。同样,陆地滑坡的沿程侵蚀及体积放大效应也远不如海底滑坡,例如:2018 年 10 月 10 日和 11 月 3 日,西藏金沙江白格先后发生了 2 次高位远程滑坡,第一次滑坡失稳体积达到 $3.4 \times 10^7 \text{ m}^3$,约 $2.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ 进入并堵塞金沙江,另有 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的滑坡物质堆积于滑面上。第二次滑坡约 $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 动力侵蚀了第一次滑坡残留于滑面上的物质,最终共导致约 $8.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的岩土体滑入并再次堵塞河道^[21-25]。

海底滑坡除了上述超乎想象的远程效应、体积效应外,还具有异常复杂的复合链动转化特征和水土交换耦合作用^[10]。这也使得海底远程滑坡运动过程中的动力侵蚀、铲刮相较于陆地滑坡有其独特性和差异性,尤其是浊流链动转化过程中特有的浊流自加速(self-acceleration)、超临界重力流(supercritical gravity flow)、坡折位置水跃(hydraulic jump)等。一般认为滑体沿途侵蚀、铲刮基底层物质会进一步改变滑体体积、基底层或滑体的流变特性,影响其运动速度、运动距离、堆积范围等一系列运动学参数,因此具有重要的研究价值^[26-27]。

虽然人们早在 19 世纪末就开始了海底滑坡运动

机理的研究,但是迄今为止,它依然被视作地质界神秘而复杂的自然现象,触发机制极其复杂、环境影响极为深远^[28]。相关问题初步总结为:海底滑坡有着陆地滑坡无法比拟的极低倾角、超长距离、特大体积的异常流动性,但现在仍缺乏对两者动力侵蚀作用本质的系统的认识;对滑行数百千米仍保持整体性结构的海底滑坡与运动中解体并最终演变为浊流的海底滑坡之间的侵蚀力学机制差异理解仍处于起步阶段。

基于此,本文在查阅大量文献的基础上,归纳和总结了海底远程滑坡动力侵蚀研究的发展现状,评述了目前研究中的难点,并希望今后此类研究有些许参考价值。

1 海底滑坡动力侵蚀主要类型

一般而言,滑坡与基底层(下伏层、底床)物质之前的强烈相互作用称之为动力侵蚀(dynamic erosion),常包括动量交换和质量交换^[26]。Pudasaini 等^[29]明确指出侵蚀是指滑体使静止基底层(basal layer)发生运动的过程,继而基底层物质被铲刮(entrainment)至上部滑体并随之共同运动的过程,即体积增长(bulking)。

动力侵蚀本质上是滑坡边界层动态变化表征,无论是泥石流还是碎屑流,宏观上所呈现的流态化行为本质上仍可采用连续介质理论来描述^[3]。根据流体力学基本理论假设提出的动力侵蚀类型:滑块底部超孔隙水压力液化模型^[30]、等效流体侵蚀模型^[31-32]、冲击侵蚀模型、犁切侵蚀模型。这些模型主要是将滑坡视作拟流体,考虑剪切、冲切、犁切及磨蚀等力学作用^[33]。此外,滑坡颗粒激振侵蚀模型,即侵蚀波动模型是学术界近年来持续追踪的一种从细观角度聚焦滑坡流动性与颗粒作用内在联系的模型^[34-36]。该模型认为颗粒流在流动状态转化过程中颗粒内部和颗粒与基底之间的高频碰撞以及颗粒力链的重新排列会产生侵蚀效应,这种侵蚀效应往往呈现“波浪”形式。如果进一步从微观考虑,在颗粒碰撞剪切过程中产生大量纳米颗粒包裹大颗粒,增加了大颗粒流动能力,即颗粒团聚侵蚀^[37]。

相较于以上几种主要针对陆地滑坡的动力侵蚀类型,海底滑坡的动力侵蚀类型和形式更加复杂多样。由于处于海水环境,滑体与水环境交界面也时刻发生质量传递,水环境、滑体耦合作用不仅影响海底滑坡的动态演变,也直接影响着其运动特征和铲刮特性^[10]。

1.1 滑坡碎屑流动力侵蚀

环境水体若侵入高速运动滑体前缘下方形成“水楔”(water intrusion),则会形成海底滑坡特有的滑水

(hydroplaning)运动现象,海底滑坡在滑水过程中减小了基底摩擦力的影响,易发生长距离运动。此外,滑坡碎屑流头部最终可能会脱离碎屑流主体继续滑移,形成远端的脱离滑块(outrunner block)^[38]。在这个过程中滑坡体前缘头部下界面水楔的不断混入(剪切混入、扩散渗入),滑块逐渐崩解演变为流动,又对流动性侵蚀起到促进作用。这个过程会反复发生,导致形成多个分离型头部滑块^[39]。

虽然每次滑水时作用范围并不大,仅在碎屑流头部起作用,但紧随其后的中部碎屑流基层由于“水楔”逃逸水体混入并混合形成基底剪切润湿层(basal shear wetting layer),该层范围要远大于滑水作用范围,从而对低坡度碎屑流搬运和侵蚀堆积起到显著的控制作用^[40-43]。

1.2 浊流动力侵蚀

海底滑体在远程运动过程中上表面、前缘端部受水体侵入发生流态转换,亦可称之为上表面侵蚀,形成速度更快的浊流,浊流高达数米每秒甚至数十米每秒的流速会带来强大的侵蚀力和破坏力^[44-45],还会引发剧烈地形演变,形成百米深的沟渠,甚至千米深的海底峡谷^[46]。一方面,前缘的浊流若形成湍流,会对基底造成湍流-剪切混合侵蚀^[47]。其中,剪切作用会导致 Kelvin-Helmholtz 涡出现,相邻两个涡易融合成具有更大湍流动能的混合涡,强烈侵蚀泥质基底^[48]。另一方面,浊流动力侵蚀中不仅需关注考虑超临界流本身的底床高剪切应力、强侵蚀能力,还应同时关注超临界流与亚临界流之间转化过程中的动力侵蚀特征。空间分布上,超临界流常见于海底峡谷及水道的陡坡位置,亚临界流在海洋盆底和陆隆位置的水道和朵体中较常见。二者通过水跃转化时,往往会形成逆行沙丘、急滩-深潭和周期阶坎的沉积(侵蚀)底形(bedform)^[49]。例如:颗粒组成主要为粗粒的浊流,在坡折位置易发生水跃,由超临界流转变为亚临界流,在水跃位置冲刷底床从而对基底产生强烈的侵蚀^[44]。此外还有一种情况,浊流通过盆地边缘陡坡或堤顶时,因反射、散射所带来的不稳定荷载会在坡面上造成坡体失稳,有的甚至进一步形成碎屑流^[50-51]。

1.3 浊流-碎屑流双向动力侵蚀

碎屑流(泥石流)-浊流相互转化是极其复杂的过程,并非仅是从滑坡碎屑流/泥石流转化为浊流的单向过程,浊流还可通过侵蚀裹挟基底泥岩、泥质基底等,进而发生湍动抑制(turbulence damping),即湍动支撑力减弱,使得流体减速沉积再转化为砂质碎屑流,通常称之为混合层(hybrid bed)效应^[52-53]。

此外,浊流自身低速运动并开始减速时,也容易出现湍动抑制现象,致使浊流尾部形成由黏土基质影响的黏性碎屑流^[45-46,54]。这种复杂的转化过程也产生了独特的侵蚀沉积底形。海底浊流剪切侵蚀松软基底沉积物是大面积广泛存在的,并以“链动”方式向下游发展,继而呈现大规模的滑移或流动^[55]。需注意的是,上述重力流上部剪切带卷吸环境水体和底部边界沉积物的侵蚀交换往往同时发生^[56-57]。

1.4 动力侵蚀类型对比

迄今为止,实测记录到海底滑坡动力侵蚀及体积放大(erosion bulking)过程的仅有两个:加拿大 Bute 湾小型海底滑坡/重力流,侵蚀导致体积增大约 0.5 m³,其规模增长却达到 50 倍;西非 Congo 峡谷海底滑坡重力流,沿程动力侵蚀约 26.5×10⁸ m³ 的沉积物,这导致了流动自加速效应,速度从 5.2 m/s 加速到 8.0 m/s,并运移了 1 130 km 超远程距离^[6]。强烈的侵蚀还可能使得浊流自我加速,从而流得更远^[58]。

当然,海底滑坡碎屑流、泥石流等复合灾害在运动过程中本身颗粒也对基层物质产生类似陆地滑坡的侵蚀作用。上述滑体本身颗粒及浊流双重作用形成海底滑坡独特的复合动力侵蚀现象,由此带来的例如火焰状构造、包卷层理、槽状构造、建造-充填构造、拼贴构造等地质侵蚀沉积特征,更进一步证明了复合动力侵蚀的特殊性和复杂性^[59]。

2 海底滑坡动力侵蚀研究发展过程

海底滑坡动力侵蚀的研究不只局限上述力学分类,实际内涵相当丰富。国内外相关研究大致可分为以下 3 个阶段:萌芽阶段(19 世纪末—20 世纪 50 年代)、形成阶段(20 世纪 60 年代—20 世纪末)、发展阶段(21 世纪初至今)。

2.1 萌芽阶段

由于海底滑坡调查手段有限,该阶段研究主要以灾情统计和零星的观测为主。英国皇家海军“挑战者号”在 1873—1876 年的开拓性深海探测中,使用重锤和绳索测量了海洋的深度,绘制了海底地形图,并记录了深海的温度和盐度等参数^[60]。英国地质学家和采矿工程师 Milne 在 1897 年的《Geographical Journal》中记录了 1616—1886 年由于地震、火山爆发等引发的 333 次海底滑坡事件,其中一些还摧毁了海缆^[61]。但他也同时意识到由于海底地震较陆地上更活跃,可能诱发的海底地质问题更加严重。瑞士地理学者 Forel 在 1890 年发现阿尔卑斯山冰融粗粒沉积物流入 Geneva 湖后运动并沉

积在深水中,他称其为“比重流”,即浊流的前身^[62]。同时期同样在瑞士阿尔卑斯山,1881年发生了 Elm 板岩采石场远程滑坡,人们观察到该陆地滑坡在运动过程中撞击一采矿平台后碰撞解体转化成流动性更强的碎屑流。瑞土地质学家 Heim 通过研究后进一步指出,陆地碎屑流颗粒之间的相互碰撞是主要力学传递方式,颗粒间空气或者其他流体降低了滑坡底部运动时的阻力^[63]。

1902年 Fisher 等^[64]在远离 California 海岸的海底峡谷发现了源自海岸的砂体沉积,判定其可能是深水浊流将海岸沙沿着海底峡谷搬运到了深海。1929年由 7.8 级大地震触发的加拿大纽芬兰 Grand Banks 海底滑坡碎屑流-浊流运动摧毁了距震源近 1 000 km 处的大部分通信电缆,并造成数十人丧生,引起了人们对海底滑坡尤其是浊流运动的关注^[65]。

荷兰学者 Kuenen 等^[66]在 1937 年发表了证实浊流存在的开拓性实验室研究成果,随后在 1950 年与意大利古生物学家、复理石发现者 Migliorini 联合发表《作为递变层起因的浊流》,标志浊流理论的建立。1953 年, Bates 等^[67]在研究三角洲时,观察到水下浊流向海方向运动时表现出三种不同的类型,分别命名为异重流(hyperpycnal flow)、异轻流(hypopycnal flow)和等重流(homopycnal flow)。1959 年,法国 Malpasset 大坝溃坝造成 500 余人死亡和失踪,并在下游 Fréjus 海湾形成了海底异重流沉积,导致“泥线”(mudline)进积^[68]。

相较陆地滑坡体现场可观测可调查,海底滑坡更为神秘也更难以触碰,研究成果也更初级,无法像陆地滑坡一样根据调查的数据,对滑体运动过程中的基底侵蚀深度及体积进行估算。但正是这些定性初步的理论,为以后的研究指明了方向,奠定了重要基础。

2.2 形成阶段

这一时期海底滑坡的研究主要从古代露头、测井及地震资料收集逐渐向基础性调查总结过渡。20 世纪 60 年代以来,随着深海钻探和大洋钻探项目的成功实施,联合国教科文组织政府间海洋学委员会在 70 年代组织了“国际海洋考察十年”,我国也从 80 年代开展近海基础性地质环境调查^[69]。1993 年美国地质调查局在 Monterey 海底峡谷布放潜标,进行了针对现代浊流过程的一系列基础性研究,这一系列基础调查考察工作使得海底不断被调查和重新认识^[70]。

同时,该时期海底滑坡灾害频发。1969 年, Camille 飓风袭击密西西比河三角洲,诱发海底滑坡造成平台破坏。1986 年 11 月台湾花莲地震致使台东龟山岛附近海域发生海底滑坡,切断了琉球群岛与关岛间的海

底电缆。1998 年发生于巴布亚新几内亚海岸的海啸也是由海底滑坡碎屑流引起,海浪波高达 15 m, 2 000 余人死亡^[10-11, 71-72]。

1962 年 Bouma^[73]通过对复理石的研究,提出了目前沿用最广泛的浊流沉积特点的鲍马序列,即垂向上有砂质、粉砂、泥质层交替、沉积物由粗变细。Dott^[74]最早尝试将海底滑坡的运动过程分为 4 种主要类型: 陷落、滑动、块状流和浊流。Kuenen^[75]进一步提出高、低密度浊流是以 1.1 g/cm^3 为界。

1973 年 Middleton 等^[76]提出了海底碎屑流、颗粒流、液化流和浊流 4 种类型是统一机制下不同阶段的演化产物,并认为高密度浊流比重介于 $1.5 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$, 这种认识成为科学界此后 60 多年滑坡浊流分类的基本框架。

1978 年 Moore^[77]根据物质组成成分认为海底滑坡仅有塌陷、滑动、流动 3 种类型,而把浊流排除在外。1979 年 Damuth^[78]提出了“沉积物波”(sediment waves)的概念,认为南海马尼拉海沟及其西侧有一个面积达 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的大型浊流形成的沉积波区。同年, Lowe^[79]按照沉积物的粒度、颗粒浓度以及沉积物支撑机制进一步将浊流划分为浊流、流化流、颗粒流、泥流或黏性碎屑流。

虽然浊流理论发展很快,但由于缺乏动力学机制和现场实测数据支撑,地质模式和分类存在一定不确定性,很快遇到了瓶颈。主要的质疑代表人物是 Shanmugam^[80],他在 1996 年提出了在深水环境下发育大规模块体搬运沉积 MTDs 以及高密度浊流实际上是砂质碎屑流(sandy debris flow)的新观点。浊流是靠湍动向上支撑沉积物的液态流,碎屑流是靠基质强度、分散压力和上浮力支撑沉积物的塑性流。高密度浊流则指靠基质强度、分散压力和上浮力支撑沉积物的非湍动高浓度液态流,属于过渡流体,性质更倾向于砂质碎屑流。浊流分类存在的争议也影响了海底滑坡演化过程分类,掀起了海底复合型地质灾害研究的热潮。

Mulder 等^[81]基于超过 100 例全新世和更新世海洋块体运动研究数据,将海底滑坡划分为三种主要类型: 滑动/滑塌、塑性流、浊流。也有科学家将海底滑坡向更广义方向发展,贾永刚等^[82]把广义流动纳入海底滑坡范畴,海底滑坡包括坍塌、滑坡、流动,其中流动根据物质组分特征及运动方式分为蠕流、液化流、颗粒流、浊流。

除了海底滑坡分类,研究人员发现浊流流速很大,可产生强烈的侵蚀作用,形成侵蚀型海底峡谷地貌,动力侵蚀等边界层效应成为关注的一个重要指标。

Middleton^[83]通过室内水槽试验发现, 浊流前缘头部经过的基底软土存在明显的侵蚀凹槽。Hampton^[84]则通过观察, 提出了泥流向浊流转化逐粒侵蚀机制(*grain-by-grain erosion/grain plucking*), 泥流表面沉积物被侵蚀带至上部流体中形成浊流, 即动应力超过沉积物本身屈服强度。Britter 等^[85]通过模拟研究了浊流改变斜坡坡度、渠道底部沉积物交换、与周围流体夹带的影响边界条件。Sassa^[86]则认为在海底滑坡转化成浊流之前也会对基床产生侵蚀作用, 尤其因基床是饱和的土层, 在上部滑体高速运动导致的不排水剪切作用下会在基床产生超孔隙水压力侵蚀层。

Garcia 等^[87]发现密度流从河床上夹带的沉积物使浊流中的悬浮沉积物增加了大约 10%。Woods 等^[88]通过试验表明, 随着斜坡倾斜度的增加, 浊流侵蚀速度随之增加而沉降速度降低, 此外, 坡度突然变化会引起的流体“拆离”和水跃可导致湍流增加、侵蚀下切能力增强。赵连军等^[89]引入了水力摩阻厚度, 考虑了流体中涡团参数、摩阻厚度及密度 Froude 数等水沙因素。Mohrig 等^[90]通过试验提出 Froude 数临界值不低于 0.4, 即碎屑流头部底下环境水形成的动压梯度超过上覆碎屑流的重量时, 就会发生滑水现象。Kneller 等^[91]参考气流研究成果, 于 1999 年提出了利用密度 Froude 数表征浊流分层特点, 其中最大湍流动能出现在靠近浊流头部的地方^[51]。

总而言之, 该阶段海底滑坡转化成浊流过程、浊流运动过程已被国内外众多学科重视, 并且针对浊流的触发机制、流体特性、运移机制、侵蚀沉积过程等多个方面展开了具体的研究。

2.3 发展阶段

该时期由于流体数值模拟手段迅速升级和海底高分辨率探测、观测技术及海上勘探手段的不断发展, 从而使得海底滑坡动力侵蚀方面研究也得以革新。

Marr 等^[91]在 2001 年的水槽试验结果表明含黏土杂基的砂质碎屑流易于向浊流发生转化。Mulder 等^[92]根据沉积物的浓度百分比, 认为浊流和碎屑流之间还存在浓缩密度流、超浓缩密度流两种类型。Talling 等^[41]归纳了海底碎屑流运动过程中主要的三种力学机制: 碎屑流顶部和上表层的两类剪切混合, 以及头部下方水楔的混入。水楔的混入又分为扩散渗入和剪切混入, 只有水楔不混入头部主体时, 才可能发生滑水现象。Mohrig 等^[39]通过室内海底碎屑流的物理模拟认为, 强黏聚力碎屑流在运动过程中, 随着头部及上部逐粒侵蚀向上悬浮, 浊流逐渐增强, 其流动速度逐渐超过碎屑流本身, 而

碎屑流与浊流之间剪切力很低, 浊流最终超过碎屑流成为主要的运动形式(图 2)。

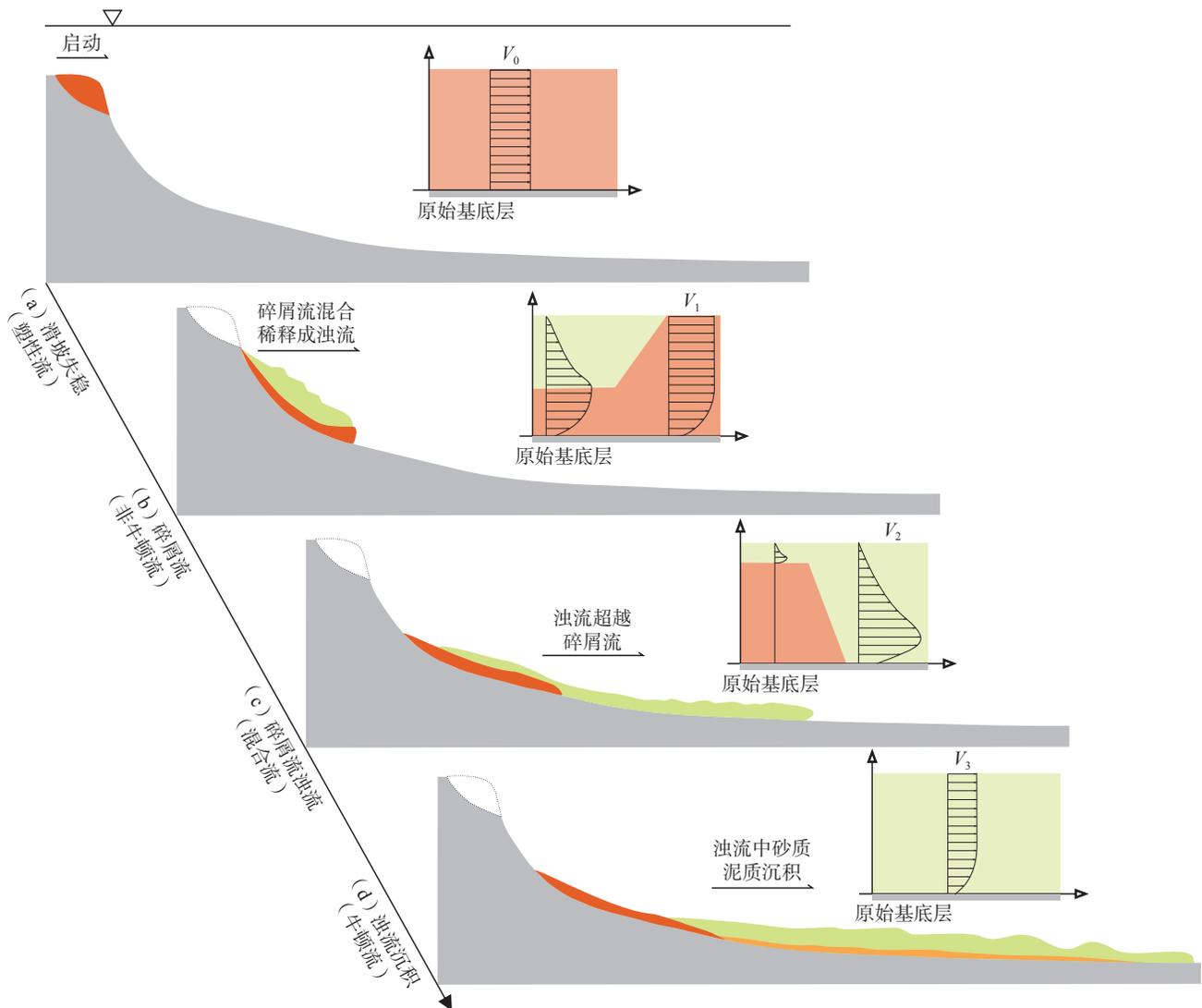
Ilstad 等^[38]通过水槽模拟试验发现, 在碎屑流头部受限水体由于碎屑流的快速剪切作用会逃逸, 并与碎屑流的体部混合, 在碎屑流的底部形成一层薄层剪切沉积层, 即基底剪切润湿层。此外, Ilstad 等^[43]通过挪威 Finneidfjord 区域发现大量独立滑块, 认为滑水会导致流体具有更高的流速以及产生更大的剪切力, 进而也会提高碎屑流向浊流的转化效率。滑水甚至会导致头部加速, 使头部与身体分离并独立移动。这个过程会反复发生, 导致产生多个分离型头部, 造成更多侵蚀, 并通过侵蚀实现更有效的转化。

Felix 等^[93]则在海底滑坡碎屑流转化浊流的试验过程中, 结合前人的研究, 于 2006 年总结提出 6 种力学转化机制: 滑坡底部液化作用、滑体运动破碎作用、碎屑流顶部剪切侵蚀作用、碎屑流中上部波动改造作用、水力跳跃作用、碎屑流前缘底部滑水作用。值得注意的是, 碎屑流中上部低密度区波动起伏加剧致使下部高密度区分裂成若干块体机制, 完全不同于滑水形成的多个分离滑块力学机理。

Huang 等^[57]开发了一个基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程及湍流动能-耗散率计算模型的程序, 通过模拟浊流及与底床沉积物的交换过程, 指出浊流由于底部剪切铲刮和夹带混合会在基底表面附近形成湍流动能峰值。不同于沉积型浊流, 侵蚀自加速型浊流在下游的湍流动能可能会增强而不是减弱。

Breien 等^[48]通过水槽模拟试验进一步证实, 含黏土杂基的砂质碎屑流呈“流态化”混合运动姿态, 这种碎屑流在顶部、中上部存在环境水的淘洗转化和剪切混合作用, 并在碎屑流头部的正前方形成前锋湍流混合区。湍流混合流对基底物质造成动力侵蚀, 这种侵蚀不同于碎屑流本体下部的非主动侵蚀(*no active erosion*)。Elverhoi 等^[94]通过不同砂黏粒含量的碎屑流试验解释了 Bear 岛深海扇复合体、Storegga 滑坡由于黏聚力较大, 在滑水和头部加速情况下, 泥质碎屑流可在平缓的地形上, 达到超高速度和超远的运行距离。相比而言, Grand Banks 滑坡由于砂质含量丰富导致内部颗粒分离, 较细的黏土和粉土形成上部低密度层, 而较粗的砂质颗粒形成下部高密度层。沿程水体侵入和流化, 显著降低了碎屑流的侵蚀能力(图 3)。

Postma 等^[95-96]根据流体浓度、Reynolds 数和 Froude 数的差异, 将浊流划分为高浓度和低浓度浊流。同期, Manica^[97]提出了浊流和碎屑流不同的剪切状流动(*shear-*

图 2 海底滑坡浊流链特征^[4,39-40,98]Fig. 2 Chain characteristics of submarine landslide-debris flow-turbidity current^[4,39-40,98]

like flow)和塞状流动(plug-like flow)速度模式。

Talling 等^[46,54]进一步证实存在高密度浊流向砂质碎屑流转化的现象。浊流在侵蚀泥质基底及减速过程中的湍动抑制效应将导致:浊流中前部基底侵蚀裹挟的泥质颗粒在局部聚集形成次级碎屑流、浊流尾部粗颗粒下沉形成黏性碎屑流。

王大伟等^[50]归纳出浊流动力学特征中 Reynolds 数决定流体是层流还是湍流, Froude 数(Fr)决定流体是超临界流($Fr>1$)还是亚临界流($Fr<1$)。钟广法^[44]则进一步依据 Froude 增大顺序, 将超临界流底形分为稳定逆行沙丘、不稳定逆行沙丘、急滩-深潭及周期阶坎等沉积(侵蚀)底形(图 4)。

Choi 等^[1]系统总结了海底滑坡物理模型试验的尺度效应问题, 指出 Hampton 数较 Reynolds 数和 Bingham

数更适合用于设计所需屈服应力和黏土含量的标准。此外, 缩尺试验低估了海底滑坡侵蚀潜力, 高估了滑水的作用。

3 海底滑坡侵蚀力学模型

3.1 等效流体动力侵蚀模型

滑坡碎屑流与基底的剪切过程, 可参考陆地滑坡, 将滑坡碎屑流整体视为等效流体(Hungr^[31]), 与基床之间的主要流动剪切本构模型有: Laminar 模型、Turbulent 模型、Plastic 模型、Bingham 模型、Frictional 模型、Voellmy 模型、Herschel-Bulkley 模型以及 Power-Low 流变模型^[3,99]。

滑坡碎屑流剪应力可以通过 Bingham 模型、Herschel-Bulkley 流变模型进行描述:

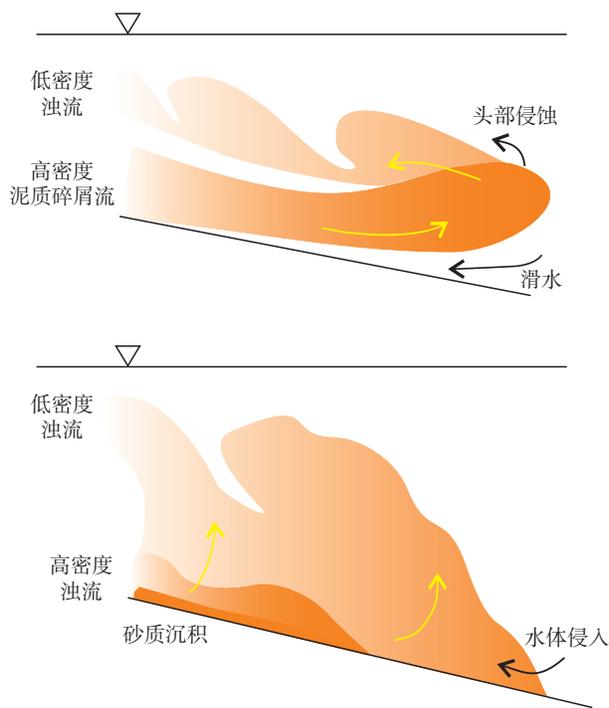


图 3 泥质碎屑流和砂质碎屑流的运动模式^[94]

Fig. 3 Patterns of clay debris flow and sandy debris flow^[94]

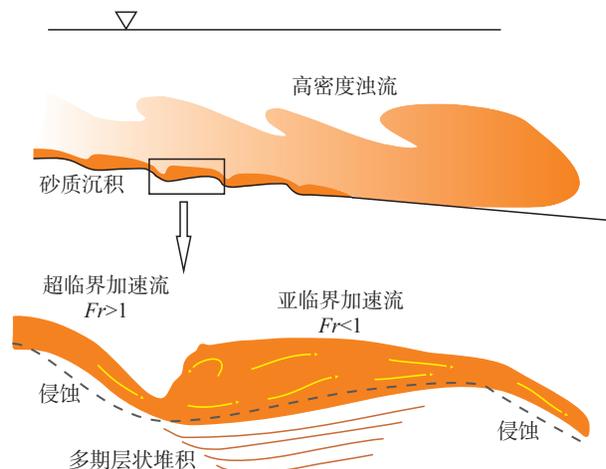


图 4 高密度浊流(超临界基底层)体动力学特征

Fig. 4 Dynamics characteristics of high-density turbidity current (supercritical base layer)

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中: τ_y ——滑坡碎屑流运动屈服强度/Pa;
 $\dot{\gamma}$ ——剪切率;
 k ——黏性参数;
 n ——塑性指数,当 $n=1$ 时,式(1)退化为 Bingham 模型。

除了流变模型,黏塑性模型也常被用作描述滑坡碎屑流剪应力^[5]:

$$\tau = \tau_y + \sigma(1 - r_u)\tan\theta + \mu\dot{\gamma}^m \quad (2)$$

式中: σ ——总应力/Pa;
 r_u ——孔隙率;
 θ ——摩擦角/(°);
 μ ——动态黏度;
 m ——当滑坡碎屑流为颗粒流时, $m>1$; 当为泥流时, $m\leq 1$ 。

动力侵蚀率可参考 McDougall 和 Hungr 在 2005 年提出的简化经验公式^[100]:

$$E = v^* \frac{h}{s} \ln\left(\frac{V_f}{V_0}\right) \quad (3)$$

式中: v^* ——滑坡碎屑流运动速度/($m \cdot s^{-1}$);
 h ——滑坡碎屑流深度/m;
 s ——侵蚀路径长度/m;
 V_f ——滑坡碎屑流的最终总体积/ m^3 ;
 V_0 ——滑坡碎屑流的初始体积/ m^3 。

浊流颗粒之间的相互作用非常小,可以视作是牛顿流体,其剪切应力可通过以下关系式进行描述:

$$\tau = \mu\dot{\gamma} = \mu\left(\frac{dv}{dz}\right) \quad (4)$$

式中: μ ——动态黏度;
 v ——水平速度/($m \cdot s^{-1}$);
 $\dot{\gamma}$ ——剪切率;
 z ——纵坐标。

浊流对于基底沉积物的动力侵蚀作用,其侵蚀率(E)往往采用经验公式计算^[87]:

$$E = \frac{3A\varepsilon^5}{3 + 10A\varepsilon^5} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{v^{**}}{v_s} R_p^{0.6} \quad (6)$$

式中: A ——常数,取值 1.33×10^{-7} ;
 ε ——Reynold 效应评估参数;
 v^{**} ——浊流剪切速度/($m \cdot s^{-1}$);
 R_p ——颗粒 Reynolds 数;
 v_s ——浊流中沉积速度/($m \cdot s^{-1}$)。

除了基底动力侵蚀之外,如前述,海底滑坡碎屑流头部和上表面受到周围水体或浊流的剪切混入或淘洗,对应的简化侵蚀公式为^[41]:

$$E = M \frac{\tau - \tau_s}{\tau_s} \quad (7)$$

式中: M ——经验常数,取值 $0.0005 \sim 0.0015$;
 τ ——剪应力/Pa;
 τ_s ——临界剪应力/Pa。

3.2 二相流动力侵蚀模型

近年来,持续发展的计算流体动力学和离散元(CFD-DEM)耦合方法由于可反映水-土耦合力学作用,能模拟海底滑坡失稳、运动演变及侵蚀沉积全过程,尤其可具化描述碎屑流、浊流运动及相互作用关系,日益受到研究人员青睐^[101]。

CFD 流体相被视为连续介质,通过求解 Navier-Stokes 方程来得到每个网格上流体的速度、密度和压力等。DEM 颗粒相则直接计算其受力,然后根据牛顿定律计算其加速度、速度和位置的变化。DEM 颗粒之间碰撞可利用 Hertz-Mindlin、JKR-Cohesion 等接触进行力学求解。

两者之间关键耦合是通过曳力模型实现的:

$$F_p = \sum_{i=1}^n F_{d,i}/V_{fc} \quad (8)$$

式中: $F_{d,i}$ ——施加在第 i 个颗粒上的曳力/N;

n ——特定计算单元中包含的粒子数量;

V_{fc} ——计算单元体积/ m^3 。

基底动力侵蚀一方面可预先假定基底为一定量的颗粒,通过颗粒之间位置变化来获得^[102],详见图 5。

$$E = 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_i \sin \alpha_{0i}}{t_i} \right) \quad (9)$$

式中: R_i ——旋转运动颗粒半径/m;

α_{0i} ——第 i 颗粒初始角度及旋转 t_i 时间后的角度/ $(^\circ)$, $\alpha_{0i} = \pi/2 - \theta$, 即认为脱离后碎屑颗粒(图 5)。

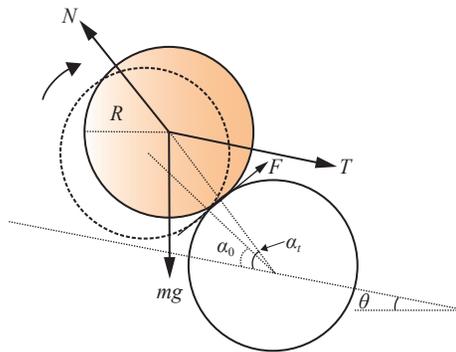


图 5 基底动力侵蚀颗粒力学模型

Fig. 5 Modelling of forces acting on an eroding particle

但若基底为松软沉积物,则可考虑使用颗粒对于基底剪切铲刮来计算侵蚀率^[103],详见图 6。

$$E = K \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_{ni} u_i}{H_B} \right) \quad (10)$$

式中: K ——Archard 侵蚀系数;

F_{ni} ——第 i 颗粒受到垂向压力/Pa;

u_i ——第 i 颗粒运动速度/ $(m \cdot s^{-1})$;

H_B ——硬度。

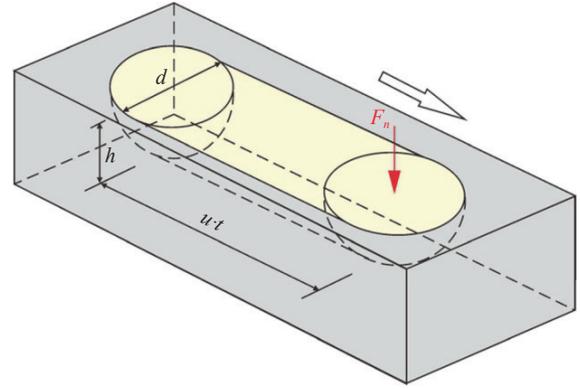


图 6 颗粒动力侵蚀基底模型

Fig. 6 A ball particle causing erosion of a surface

CFD-DEM 耦合方法目前仍处于发展阶段,采用其对海底滑坡开展全过程大流域的运动演变模拟仍在研究中,动力侵蚀的模型和算法也急需进一步研发^[10]。

4 复杂地貌对滑坡浊流侵蚀的影响机制

前述虽然提到了地貌会影响滑坡碎屑流-浊流的运动路径和侵蚀沉积特征,但多偏于二维的描述^[104]。实际上海底滑坡浊流是三维空间复杂流体,兼具时空动态演化复合特征。滑坡浊流对下垫面地貌反射、偏转、水跃等多维响应使得流体运动的有效防治尤为困难^[53]。

4.1 海底隆起与盆地

微盆地(micro basin)是海底陆坡上典型的构造地貌,常由重力滑脱、重力扩展及逆冲作用形成。Kneller 和 McCaffrey 提出浊流中净加速度 $du/dt > 0$ 的汇聚流(accumulative flow)更易引起盆地边缘动力侵蚀(图 7),此时流体的平均流速不小于最大颗粒的悬浮阈值^[91]。浊流净加速度公式为:

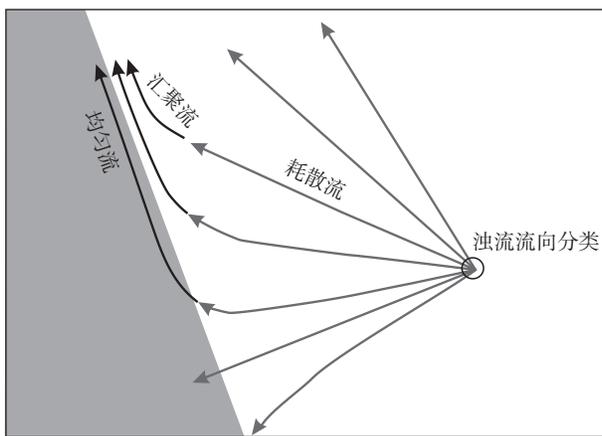
$$du/dt = \partial u / \partial t + u \cdot \partial u / \partial x \quad (11)$$

式中: $\partial u / \partial t$ ——浊流时间加速度/ $(m \cdot s^{-2})$;

$u \cdot \partial u / \partial x$ ——浊流的瞬时空间速度梯度。

Strauss 和 Glinsky 使用基于高分别率的二维数值模型模拟浊流流经一个可侵蚀障碍物的情形,发现障碍物虽然开始是沉积物波的形成触发器,但在多次流动之后障碍物就会被侵蚀殆尽,不再影响沉积物波的形成和发展^[105]。

Soutter 等^[106]通过水槽试验模拟研究了浊流在遇到

图 7 浊流流线分类^[51]Fig. 7 Streamline classification of the turbid currents^[51]

褶皱、底辟、逆冲断层等带状隆起地形时的侵蚀特征,发现浊流的流向与隆起地形走向之间存在密切联系:当流向与隆起地形走向一致时,浊流运动受隆起地形侧向约束,同时侵蚀隆起地形边缘,但浊流运动速度反而得以增强,较无地貌影响时运动距离更远;若流向与隆起地形走向垂直时,浊流运动因受到隆起地形正面拦挡而越顶翻流,发生水跃侵蚀和沉积,部分浊流则发生回流。若流向与隆起地形走向斜交时,部分浊流沿着隆起地形走向发生偏转并因流线收敛而形成汇聚流,速度加大,对隆起地形表层侵蚀效应更加明显。由于沉积同时发生造成隆起地形相对高差降低,部分越顶浊流进一步对隆起地形顶部造成侵蚀^[51]。

4.2 海底峡谷

Talling 等^[58]通过对比 2019—2020 年 Congo 海底峡谷上游两段峡谷-水道侵蚀情况,发现峡谷陡壁及海底堰塞坝体易发生较为强烈的侵蚀,侵蚀深度甚至达到 20~30 m。并通过进一步与前锋速度较为一致的 Monterey 海底峡谷对比发现,浊流前锋速度与滑坡浊流运行距离及侵蚀程度相关性不大。

Chen 等^[107]认为 2021 年尼泊尔发生的 Melamchi 灾难性洪水演进过程中沿途侵蚀剧烈,并引发了下游侵蚀级联(erosional cascade),在之前的峡谷堆积物坝中形成 100 m 深的侵蚀切口,诱发了大量新的滑坡。实际该复合级联过程与海底浊流以下切侵蚀的方式过路充填沉积物的盆地,进一步诱发滑坡、泥石流等链式灾害侵蚀模式极为相似^[108]。

5 结论与展望

5.1 主要结论

随着我国海上风电、海洋资源开发、海洋交通运

输、海洋工程装备等重大工程兴建和“建设海洋强国”重大战略任务的实施,仅从理论上研究海底滑坡运动机理已经很难实现保障海洋重大工程和海洋地质安全的迫切要求。因此,以海底滑坡动力侵蚀过程为研究线索,回顾并总结了国内外关于海底滑坡浊流动力侵蚀类型、触发-演化-运移-侵蚀沉积机制、侵蚀理论模型及复杂地貌的影响,得出以下结论:

(1)不同于陆地滑坡基底层被铲刮和侵蚀的单向模式,海底滑坡动力侵蚀类型更多,范围更广,引发体积效应更巨大,包括含超孔隙水压力液化侵蚀、剪切混入、扩散渗入的滑坡碎屑流侵蚀,含湍流-剪切混合、超临界流-亚临界流转化、改流汇聚冲击的浊流动力侵蚀,以及浊流与碎屑流间双向转化动力侵蚀。对应的侵蚀沉积特征形式也更为多样。

(2)高密度浊流与碎屑流的边界划分及相互转化一直是世界性难题,加之碎屑流侵蚀的部位不仅是基底,碎屑流顶部、上层都存在侵蚀-浊流转化作用,且泥质碎屑流和砂质碎屑流运动侵蚀过程差别较大;反过来,浊流在侵蚀泥质基底及减速过程中的湍动抑制效应将形成次级碎屑流。因此海底滑坡浊流的触发-演化-运移-侵蚀沉积模式相当复杂,不仅是滑坡-碎屑流-浊流-沉积单向模式,还存在灾害链的复合、叠合和异构,动力侵蚀机制与碎屑流-浊流转化过程存在深度耦合关系。

(3)海底滑坡浊流侵蚀力学模型目前主要以等效流体侵蚀、二相流动力侵蚀模型为代表,前者将滑坡碎屑流视为拟流体,与浊流一起对基底造成动力侵蚀,后者认为浊流、水流等流体可直接或拖曳颗粒碎屑对基底物质造成侵蚀。但总地来说,海底侵蚀力学模型仍处于单一阶段,单一过程向多相和全过程发展阶段。

(4)复杂地貌对滑坡浊流侵蚀的影响主要集中于隆起、峡谷、盆地等地形地貌对浊流的改流聚能侵蚀和沿程侵蚀级联效应。这对于今后海底滑坡浊流动力侵蚀防治具有重要的参考意义。

5.2 展望

尽管海底滑坡浊流研究在动力侵蚀方面取得了相当的进展,但当前的定性-半定量的研究结果距离服务保障海洋地质安全,建设海洋强国还有一定的距离。未来研究重点可朝着定量、多相、全过程、侵蚀-流态转化耦合等方向发展:

(1)易蚀结构地质模型研究。海底滑坡浊流动力侵蚀时具有独特的火焰状构造、包卷层理、槽状构造、建造-充填构造、拼贴构造等复合动力侵蚀现象。如何辨识基底易蚀结构、建立易蚀结构地质模型成为海底滑

坡浊流地质灾害防灾减灾的前提。

(2)动力侵蚀力学模型研究。除了滑坡碎屑流、浊流对于基底单一过程、单一阶段的动力侵蚀力学模型外,还需进一步在滑坡-碎屑流-浊流灾害链的复合、叠合和异构中建立相适应的全过程模型。

(3)动力侵蚀防控理论技术研究。海洋环境复杂,施工条件更为严苛,其动力侵蚀防治不能完全照搬陆地高位远程滑坡的固源、拦挡和改流等侵蚀防控工程。需要结合海底特殊的地形地貌、地质构造、易蚀结构等研究成果,有针对性的研发系列边界层防蚀、控流、消能技术。

参考文献(References):

- [1] CHOI C E, YU Jiantao, ZHANG Jiaqi. Review of the missing link between field and modeled submarine debris flows: Scale effects of physical modeling [J] . *Earth Science Reviews*, 2024, 258: 104911.
- [2] MIDDLETON G. Sediment deposition from turbidity currents [J] . *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, 21: 89 – 114.
- [3] YIN Yueping, LI Bin, GAO Yang, et al. Geostructures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides [J] . *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 66 – 101.
- [4] FISHER R V. Submarine volcanoclastic rocks [J] . *Geological Society, London, Special Publications*, 1984, 16(1): 5 – 27.
- [5] LOCAT J, LEE H J. Submarine landslides: Advances and challenges [J] . *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(1): 193 – 212.
- [6] BÖTTNER C, STEVENSON C J, ENGLERT R, et al. Extreme erosion and bulking in a giant submarine gravity flow [J] . *Science Advances*, 2024, 10(34): 2584.
- [7] PIPER D J W, COCHONAT P, MORRISON M L. The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: Initiation of debris flows and turbidity current inferred from sidescan sonar [J] . *Sedimentology*, 1999, 46(1): 79 – 97.
- [8] VANNESTE M, SULTAN N, GARZIGLIA S, et al. Seafloor instabilities and sediment deformation processes: The need for integrated, multi-disciplinary investigations [J] . *Marine Geology*, 2014, 352: 183 – 214.
- [9] REN Zhiyuan, ZHAO Xi, LIU Hua. Numerical study of the landslide tsunami in the South China Sea using Herschel-Bulkley rheological theory [J] . *Physics of Fluids*, 2019, 31(5): 056601.
- [10] 年廷凯, 沈月强, 郑德凤, 等. 海底滑坡链式灾害研究进展 [J] . *工程地质学报*, 2021, 29(6): 1657 – 1675.
- [11] 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 and Oceanic Sciences*, 2008, 19(6): 767.
- [12] 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. [WU Shiguo, QIN Zhiliang, WANG Dawei, et al. Seismic characteristics and triggering mechanism analysis of mass transport deposits in the northern continental slope of the South China Sea [J] . *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(12): 3184 – 3195. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LI Wei, LI Yan, OMOSANYA K O L, et al. Quantitative and geomorphologic parameterization of megaclasts within mass-transport complexes, offshore Taranaki Basin, New Zealand [J] . *GSA Bulletin*, 2022, 135(7/8): 1828 – 1843.
- [14] STAGNA M D, MASELLI V, VAN VLIET A. Large-scale submarine landslide drives long-lasting regime shift in slope sediment deposition [J] . *Geology*, 2023, 51(2): 167 – 173.
- [15] KARSTENS J, HAFLIDASON H, BERNDT C, et al. Revised Storegga Slide reconstruction reveals two major submarine landslides 12, 000 years apart [J] . *Communications Earth & Environment*, 2023, 4(1): 55.
- [16] SUN Qiliang, WANG Qing, SHI Fengyan, et al. Runup of landslide-generated tsunamis controlled by paleogeography and sea-level change [J] . *Communications Earth & Environment*, 2023, 434: P107745.
- [17] BLASIO F, ELVERHØI A, ENGVIK L, et al. Understanding the high mobility of subaqueous debris flows [J] . *Norw J Geol*, 2006, 86(3): 275 – 284.
- [18] 殷跃平, 高少华. 高位远程地质灾害研究: 回顾与展望 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(1): 1 – 18. [YIN Yueping, GAO Shaohua. Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(1): 1 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张明, 殷跃平, 吴树仁, 等. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望 [J] . *工程地质学报*, 2010, 18(6): 805 – 817. [ZHANG Ming, YIN Yueping, WU Shuren, et al. Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(6): 805 – 817. (in Chinese with English abstract)]
- [20] HANCE J J. Submarine slope stability[D]. Austin: The

- University of Texas at Austin, 2003: 1 – 15.
- [21] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534 – 1551. [XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018 [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1534 – 1551. (in Chinese with English abstract)]
- [22] FAN Xuanmei, XU Qiang, ALONSO-RODRIGUEZ A, et al. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: Prime investigation, early warning, and emergency response [J]. *Landslides*, 2019, 16(5): 1003 – 1020.
- [23] 王立朝, 温铭生, 冯振, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 1 – 9. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 冯文凯, 张国强, 白慧林, 等. 金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 415 – 425. [FENG Wenkai, ZHANG Guoqiang, BAI Huilin, et al. A preliminary analysis of the formation mechanism and development tendency of the huge baige landslide in Jinsha River on October 11, 2018 [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 415 – 425. (in Chinese with English abstract)]
- [25] WANG Wenpei, YIN Yueping, ZHU Sainan, et al. Investigation and numerical modeling of the overloading-induced catastrophic rockslide avalanche in Baige, Tibet, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(4): 1765 – 1779.
- [26] 何可, 王玉峰, 程谦恭, 等. 高速远程滑坡底部裹挟机理研究现状及展望 [J]. 工程地质学报, 2024, 32(3): 904 – 917. [HE Ke, WANG Yufeng, CHENG Qiangong, et al. Research on the substrate entrainment dynamics of rock avalanches: State-of-the-art [J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(3): 904 – 917. (in Chinese with English abstract)]
- [27] CROSTA G B, IMPOSIMATO S, RODDEMAN D. Numerical modelling of entrainment/deposition in rock and debris-avalanches [J]. *Engineering Geology*, 2009, 109(1/2): 135 – 145.
- [28] MILNE J. Sub-oceanic changes [J]. *The Geographical Journal*, 1897, 10(2): 129.
- [29] PUDASAINI S P, KRAUTBLATTER M. The mechanics of landslide mobility with erosion [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 6793.
- [30] SASSA S, SEKIGUCHI H. Liqsedflow: Role of two-phase physics in subaqueous sediment gravity flows [J]. *Soils and Foundations*, 2010, 50(4): 495 – 504.
- [31] HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(4): 610 – 623.
- [32] HUNGR O. Simplified models of spreading flow of dry granular material [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(8): 1156 – 1168.
- [33] 殷跃平, 王文沛. 高位远程滑坡动力侵蚀犁切计算模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1513 – 1521. [YIN Yueping, WANG Wenpei. A dynamic erosion plowing model of long Run-out landslides initialized at high locations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1513 – 1521. (in Chinese with English abstract)]
- [34] CAMPBELL C. Granular material flows – An overview [J]. *Powder Technology*, 2006, 162(3): 208 – 229.
- [35] CAMPBELL C S. Self-lubrication for long runout landslides [J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(6): 653 – 665.
- [36] ZHOU G G D, SUN Q C. Three-dimensional numerical study on flow regimes of dry granular flows by DEM [J]. *Powder Technology*, 2013, 239: 115 – 127.
- [37] HU Wei, XU Qiang, MCSAVENEY M, et al. The intrinsic mobility of very dense grain flows [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 580(Sup C): 117389.
- [38] ILSTAD T, DE BLASIO F V, ELVERHØI A, et al. On the frontal dynamics and morphology of submarine debris flows [J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1/2/3/4): 481 – 497.
- [39] MOHRIG D, MARR J G. Constraining the efficiency of turbidity current generation from submarine debris flows and slides using laboratory experiments [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/7/8): 883 – 899.
- [40] TALLING P J. On the frequency distribution of turbidite thickness [J]. *Sedimentology*, 2001, 48(6): 1297 – 1329.
- [41] TALLING P J, PEAKALL J, SPARKS R S J, et al. Experimental constraints on shear mixing rates and processes: Implications for the dilution of submarine debris flows [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2002, 203(1): 89 – 103.
- [42] TALLING P J, AMY L A, WYNN R B, et al. Beds comprising debrite sandwiched within co-genetic turbidite: Origin and widespread occurrence in distal depositional environments [J]. *Sedimentology*, 2004, 51(1): 163 – 194.
- [43] ILSTAD T, ELVERHØI A, ISSLER D, et al. Subaqueous

- debris flow behaviour and its dependence on the sand/clay ratio: A laboratory study using particle tracking [J] . *Marine Geology*, 2004, 213(1/2/3/4): 415 – 438.
- [44] 钟广法. 超临界浊流之地貌动力学和沉积特征 [J] . *沉积学报*, 2023, 41(1): 52 – 72. [ZHONG Guangfa. Morphodynamics of supercritical turbidity currents and sedimentary characteristics of related deposits [J] . *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(1): 52 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [45] TALLING P J. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: Deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models [J] . *Geosphere*, 2013, 9(3): 460 – 488.
- [46] TALLING P J, PAULL C K, PIPER D J W. How are subaqueous sediment density flows triggered, what is their internal structure and how does it evolve? Direct observations from monitoring of active flows [J] . *Earth-Science Reviews*, 2013, 125: 244 – 287.
- [47] ABREU V, SULLIVAN M, PIRMEZ C, et al. Lateral accretion packages (LAPs): An important reservoir element in deep water sinuous channels [J] . *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/7/8): 631 – 648.
- [48] BREIEN H, DE BLASIO F V, ELVERHOI A, et al. Transport mechanisms of sand in deep-marine environments—insights based on laboratory experiments [J] . *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(11): 975 – 990.
- [49] ZHAO Enjin, DONG Youkou, TANG Yuezhao, et al. Numerical investigation of hydrodynamic characteristics and local scour mechanism around submarine pipelines under joint effect of solitary waves and currents [J] . *Ocean Engineering*, 2021, 222: 108553.
- [50] 王大伟, 白宏新, 吴时国. 浊流及其相关的深水底形研究进展 [J] . *地球科学进展*, 2018, 33(1): 52 – 65. [WANG Dawei, BAI Hongxin, WU Shiguo. The research progress of turbidity currents and related deep-water bedforms [J] . *Advances in Earth Science*, 2018, 33(1): 52 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [51] KNELLER B, MCCAFFREY W. Depositional effects of flow nonuniformity and stratification within turbidity currents approaching a bounding slope; deflection, reflection, and facies variation [J] . *Journal of Sedimentary Research*, 1999, 69(5): 980 – 991.
- [52] 谈明轩, 朱筱敏, 耿名扬, 等. 沉积物重力流流体转化沉积—混合事件层 [J] . *沉积学报*, 2016, 34(6): 1108 – 1119. [TAN Mingxuan, ZHU Xiaomin, GENG Mingyang, et al. The flow transforming deposits of sedimentary gravity flow-hybrid event bed [J] . *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1108 – 1119. (in Chinese with English abstract)]
- [53] 葛智渊, 许鸿翔. 浊流对复杂构造地貌的水动力和沉积响应 [J] . *古地理学报*, 2023, 25(5): 1090 – 1117. [GE Zhiyuan, XU Hongxiang. Hydraulic and sedimentary responses of turbidity current to structurally-controlled topography [J] . *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(5): 1090 – 1117. (in Chinese with English abstract)]
- [54] TALLING P J, ALLIN J, ARMITAGE D A, et al. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits [J] . *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(2): 153 – 169.
- [55] REN Yupeng, ZHANG Yi, XU Guohui, et al. The failure propagation of weakly stable sediment: A reason for the formation of high-velocity turbidity currents in submarine canyons [J] . *Journal of Oceanology and Limnology*, 2023, 41(1): 100 – 117.
- [56] HUANG Heqing, IMRAN J, PIRMEZ C. Numerical study of turbidity currents with sudden-release and sustained-inflow mechanisms [J] . *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(9): 1199 – 1209.
- [57] HUANG H, IMRAN J, PIRMEZ C. Numerical modeling of poorly sorted depositional turbidity currents [J] . *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C1): C01014.
- [58] TALLING P J, BAKER M L, POPE E L, et al. Longest sediment flows yet measured show how major rivers connect efficiently to deep sea [J] . *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4193.
- [59] 王玉峰, 林棋文, 李坤, 等. 高速远程滑坡动力学研究进展 [J] . *地球科学与环境学报*, 2021, 43(1): 164 – 181. [WANG Yufeng, LIN Qiwen, LI Kun, et al. Review on rock avalanche dynamics [J] . *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(1): 164 – 181. (in Chinese with English abstract)]
- [60] JOHN MURRAY. The report on the scientific results of the voyage of h. m. s challenger during the years 1873-76 [M] . Shanghai: East China Normal University Press, 2018: 1 – 7.
- [61] SAXOV S. Marine slides—some introductory remarks [C] // In: Saxov, S., Nieuwenhuis, J. K. *Marine Slides and Other Mass Movements*. NATO Conference Series, Boston, MA, Springer, 1982.
- [62] 湖泊及流域学科发展战略研究秘书组. 湖泊及流域科学研究进展与展望 [J] . *湖泊科学*, 2002, 14(4): 289 – 300. [The Research Group of the Development Strategy of Limnology and Watershed Sciences. The development review and future prospect of the research in limnology and watershed sciences [J] . *Journal of Lake Science*, 2002, 14(4): 289 – 300. (in Chinese)]
- [63] HEIM A. *Bergsturz und menschenleben* [M] . Zütich:

- Naturforschenden Gesellschaft, 1932: 218.
- [64] FISHER R V, SMITH A L, ROOBOL M J. Destruction of St. Pierre, Martinique, by ash-cloud surges, may 8 and 20, 1902 [J] . *Geology*, 1980, 8(10): 472.
- [65] HEEZEN B C, EWING W M. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks [Newfound land] earthquake [J] . *American Journal of Science*, 1952, 250(12): 849 - 873.
- [66] KUENEN P H, MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J] . *Journal of Geology*, 1950, 58(2): 91 - 127.
- [67] BATES R L, JACKSON J A. Glossary of geology (2nd) [M] . Virginia: American Geological Institute, 1980: 751.
- [68] MULDER T, ZARAGOSI S, JOUANNEAU J M, et al. Deposits related to the failure of the Malpasset Dam in 1959 An analogue for hyperpycnal deposits from jökulhlaups [J] . *Marine Geology*, 2009, 260(1/2/3/4): 81 - 89.
- [69] 刘锡清. 中国海洋环境地质学 [M] . 北京: 海洋出版社, 2006: 15 - 18. [LIU Xiqing. Marine environmental geology of China [M] . Beijing: Marine Ocean Publishing House, 2006: 15 - 18. (in Chinese)]
- [70] 徐景平. 科学与技术并进——近 20 年来海底峡谷浊流观测的成就和挑战 [J] . *地球科学进展*, 2013, 28(5): 552 - 558. [XU Jingping. Accomplishments and challenges in measuring turbidity currents in submarine canyons [J] . *Advances in Earth Science*, 2013, 28(5): 552 - 558. (in Chinese with English abstract)]
- [71] 朱超祁, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 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(6): 153 - 163. [ZHU Chaoqi, JIA Yonggang, LIU Xiaolei, et al. Classification and genetic mechanism of submarine landslide: A review [J] . *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 153 - 163. (in Chinese with English abstract)]
- [72] TAPPIN D R, WATTS P, MCMURTRY G M, et al. The sissano, Papua new Guinea tsunami of July 1998— Offshore evidence on the source mechanism [J] . *Marine Geology*, 2001, 175(1/2/3/4): 1 - 23.
- [73] BOUMA A H. Sedimentology of some Flysch deposits; a graphic approach to facies interpretation [M] . Amsterdam: Elsevier, 1962: 168.
- [74] DOTT R H. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes [J] . *AAPG Bulletin*, 1963, 47(1): 104 - 128.
- [75] KUENEN P H. Emplacement of flysch-type sand beds [J] . *Sedimentology*, 1967, 9(3): 203 - 243.
- [76] MIDDLETON G V, HAMPTON M A. Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition [C] //MIDDLETON G V, BOUMA A H, eds. *Turbidites and Deep-Water Sedimentation*. Los Angeles, California: SEPM Pacific Section, 1973: 1 - 38.
- [77] MOORE D G. Submarine slides [M] . *Developments in Geotechnical Engineering*. Elsevier, 1978, 14: 563 - 604.
- [78] DAMUTH J E. Migrating sediment waves created by turbidity currents in the northern South China Basin [J] . *Geology*, 1979, 7: 520 - 523.
- [79] LOWE D. Sediment gravity flows: Their classification and some problems of application to natural flows and deposits [J] . *Special Publications*, 1979, 27: 75 - 82.
- [80] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents; are they sandy debris flows? [J] . *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 2 - 10.
- [81] MULDER T, COCHON P. Classification of offshore mass movements [J] . *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 43 - 57.
- [82] 贾永刚, 单红仙. 黄河口海底斜坡不稳定性调查研究 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2000, 11(1): 1 - 5. [JIA Yonggang, SHAN Hongxian. Investigation and study of slope instability of subaqueous delta of morden Yellow River [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2000, 11(1): 1 - 5. (in Chinese with English abstract)]
- [83] MIDDLETON G V. Experiments on density and turbidity currents: Iii. deposition of sediment [J] . *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1967, 4(3): 475 - 505.
- [84] HAMPTON M A. The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents [J] . *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 1972, 42(3): 475 - 505.
- [85] BRITTER R E, SIMPSON J E. Experiments on the dynamics of a gravity current head [J] . *Journal of Fluid Mechanics*, 1978, 88(2): 223 - 240.
- [86] SASSA K. Geotechnical model for the motion of landslides [J] . *Special Lecture of 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, 1988, 1(7): 37 - 55.
- [87] GARCIA M, PARKER G. Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current [J] . *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1993, 98(C3): 4793 - 4807.
- [88] WOODS A W, BURSİK M I. A laboratory study of ash flows [J] . *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B3): 4375 - 4394.
- [89] 赵连军, 张红武. 黄河下游河道水流摩阻特性的研究 [J] . *人民黄河*, 1997, 19(9): 17 - 20. [ZHAO Lianjun, ZHANG Hongwu. Study of flow frictional characteristics in the lower Yellow River channel [J] . *Yellow River*, 1997, 19(9): 17 - 20. (in Chinese with English abstract)]
- [90] MOHRIG D, ELLIS C, PARKER G, et al. Hydroplaning of

- subaqueous debris flows [J] . *Geological Society of America Bulletin*, 1998, 110(3): 387 – 394.
- [91] 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.
- [92] MULDER T, ALEXANDER J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits [J] . *Sedimentology*, 2001, 48(2): 269 – 299.
- [93] FELIX M, PEAKALL J. Transformation of debris flows into turbidity currents: Mechanisms inferred from laboratory experiments [J] . *Sedimentology*, 2006, 53(1): 107 – 123.
- [94] ELVERHOI A, BREIEN H, DE BLASIO F V, et al. Submarine landslides and the importance of the initial sediment composition for Run-out length and final deposit [J] . *Ocean Dynamics*, 2010, 60(4): 1027 – 1046.
- [95] POSTMA G, KLEVERLAAN K, CARTIGNY M J B. Recognition of cyclic steps in sandy and gravelly turbidite sequences, and consequences for the Bouma facies model [J] . *Sedimentology*, 2014, 61(7): 2268 – 2290.
- [96] POSTMA G, CARTIGNY M J B. Supercritical and subcritical turbidity currents and their deposits: A synthesis [J] . *Geology*, 2014, 42(11): 987 – 990.
- [97] MANICA R. Sediment gravity flows: Study based on experimental simulations [M] . *Hydrodynamics - Natural Water Bodies*, Prof. Harry Schulz (Ed.) InTech, 2012: 263 – 286.
- [98] HAUGHTON P, DAVIS C, MCCAFFREY W, et al. Hybrid sediment gravity flow deposits—classification, origin and significance [J] . *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 1900 – 1918.
- [99] IMRAN J, HARFF P, PARKER G. A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface [J] . *Computers & Geosciences*, 2001, 27(6): 717 – 729.
- [100] MCDUGALL S, HUNGR O. Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides [J] . *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(5): 1437 – 1448.
- [101] LU Yang, LIU Xiaolei, XIE Xiaotian, et al. Particle-scale analysis on dynamic response of turbidity currents to sediment concentration and bedforms [J] . *Physics of Fluids*, 2024, 36(3): 033316.
- [102] KANG Chao, CHAN D. A progressive entrainment runoff model for debris flow analysis and its application [J] . *Geomorphology*, 2018, 323: 25 – 40.
- [103] WANG Wenpei, YIN Yueping, WEI Yunjie, et al. Investigation and characteristic analysis of a high-position rockslide avalanche in Fangshan District, Beijing, China [J] . *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(3): 2069 – 2084.
- [104] 孙永福, 黄波林, 赵永波. 基于物理试验的海底滑坡涌浪研究 [J] . *水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 116 – 122. [SUN Yongfu, HUANG Bolin, ZHAO Yongbo. A study of the submarine landslide-induced impulse wave based on physical experiments [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 116 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [105] STRAUSS M, GLINSKY M E. Turbidity current flow over an erodible obstacle and phases of sediment wave generation [J] . *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C6): C06007.
- [106] SOUTTER E L, BELL D, CUMBERPATCH Z A, et al. The influence of confining topography orientation on experimental turbidity currents and geological implications [J] . *Frontiers in Earth Science*, 2021, 8: 540633.
- [107] CHEN Chanmao, HOLLINGSWORTH J, CLARK M K, et al. Erosional cascade during the 2021 melamchi flood [J] . *Nature Geoscience*, 2024, 18(1): 32 – 36.
- [108] SINCLAIR H D, TOMASSO M. Depositional evolution of confined turbidite basins [J] . *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(4): 451 – 456.