地质灾害物理仿真实验发展现状及趋势分析

肖子亢[1,2]，许冲[1,2*]，李宏[1,2]，黄帅[1,2]，李博[1,2]，何祥丽[1,2]

1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院，北京 100085；
2. 复合链生自然灾害动力学应急管理部重点实验室，北京 100085

第一作者，E-mail：zikangxiao@ninhm.ac.cn

* 通信作者，E-mail：xc11111111@126.com

2024-08-15 收稿；2024-10-16 修回；2024-10-21 接受

基金项目：应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务专项（ZDJ2022-20; ZDJ2024-16; 2023-JBKY-57）

中图分类号：P694；TP391.9　　文章编号：2096-8523（2025）04-0023-25　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240454

摘　要： 在近 20 a 中，地质灾害物理仿真实验呈现出学科交叉、应用广泛、更新迅速的发展现状。开展地质灾害物理仿真实验发展现状及趋势分析，有助于让相关研究人员掌握行业现状并根据发展趋势设计实验、研发设备、更新技术，促进地质灾害关键理论的创新发展。调研大量的国内外地质灾害物理仿真实验相关文献，总结了开展地质灾害物理仿真实验的 5 个意义，并对 6 个物理仿真关键技术逐一进行了现状分析。其中模型箱和水槽是应用最广泛的仿真技术。底摩擦仿真技术在二维场景中实现了模型与重力场的耦合；振动台和离心机技术可为仿真实验提供振动与重力环境，在物理仿真实验中发挥着不可替代的作用。原位仿真技术在避免缩尺效应、边界效应、重力失真等方面具有显著优势。地质灾害物理仿真实验正朝着场景构建复杂化、实验规模大型化、材料选择科学化和数据采集智能化的方向发展，这对实验技术与经济成本提出了更高的要求，亟需营造良性发展环境，让物理仿真技术在地质灾害研究中的发挥出更大作用。

关键词： 物理仿真实验；地质灾害；发展现状；趋势分析

物理仿真实验是模拟地质体变形破坏过程、揭示地质灾害致灾机理的重要手段之一[1-5]。实验基于相似性原则开展，利用力学性质相似的仿真材料建立地质体的简易模型，并利用模型箱、水槽等设备实现对地质体失稳与灾害演进过程进行模拟仿真[6-7]。地质灾害物理仿真技术从物理学角度实现了地质灾害的情景再现，降低了地质灾害数据采集和机制分析的难度，为地质灾害机理研究提供了一个既安全又高效的研究方法。

本研究收集了近 350 篇与地质灾害物理仿真实验高度相关的文献，从每年发文趋势可以发现，1990 年之前全球每年地质灾害物理仿真实验相关发文数量较少，且平稳增长。1990 年之后每年发文数量快速增长，尤其是 2010 年之后（图 1）。因此综合考虑文献发表数量以及文章主要研究内容，将地质灾害物理仿真技术的发展划分为 3 个阶段。第一阶段为早期发展阶段（1980 年及之前），这一阶段的地质灾害物理仿真实验以简单的原位实验、简易的水槽实验与底摩擦实验为主[8-12]，这些简易实验给地质灾害物理仿真实验的发展提供了重要的理论和技术基础。第二阶段为快速发展阶段（1990—2010 年），随着全球范围内关于自然灾害风险防范意识的逐渐提高[13-14]，大量关于地质灾害机理研究的实验室及实验设备开始建设，例如美国国家地震工程模拟网络（network for earthquake engineering simulation，简称 NEES）系统[15]、美国地质调查局（United States Geo-

著录信息： 肖子亢，许冲，李宏，等. 地质灾害物理仿真实验发展现状及趋势分析［J］. 地质科技通报，2025，44（4）：23-47.
XIAO Zikang, XU Chong, LI Hong, et al. Development status and trend analysis of physical simulation experiments for geological hazards［J］. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44（4）: 23-47.

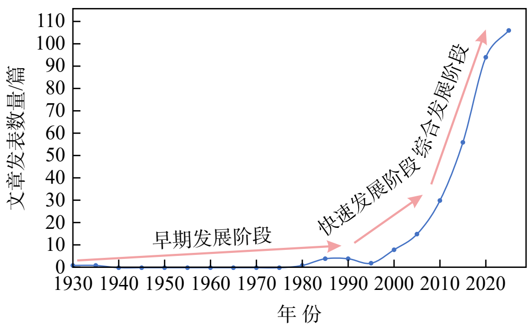


图 1　全球地质灾害物理仿真实验相关文章年发表数量统计图

Fig. 1　Statistical chart of the annual publication quantity of articles related to physical simulation experiments of geological hazards

logical Survey, 简称 USGS)大型仿真水槽[16]、日本三维原型地震实验设施(3D full scale earthquake testing facility, 简称 E-Defense)振动台[17]、美国大型高性能户外振动台(large high performance outdoor shake table, 简称 LHPOST6)[18] 等大型物理仿真设备均在这一阶段建成并投入使用。基于此, 地质灾害物理仿真实验进入快速发展的阶段。同时, 得益于这一阶段材料科学与自动化工程的高速发展, 地质灾害物理仿真实验相关技术开始快速迭代更新。第三阶段为综合发展阶段(2010 年至今), 2010 年以来, 全球自然灾害在频度、强度和复杂度等方面呈现出新的态势[19-20], 这对地质灾害物理仿真实验的设计提出了更高要求, 大规模地质灾害野外实验基地[21]、大型物理仿真设备[22]、高精度监测设备[23] 纷纷被应用到物理仿真实验中, 带来了地质灾害物理仿真实验的全面与综合性发展。值得注意的是, 物理模拟设备的建设需要配套科研经费, 与国民经济高度耦合。日本、美国、英国等发达国家的经济飞速发展时期也是大型科研设备投资建设的高峰期, 得益于此, 这些国家在地质灾害机理方取得了丰富的研究成果, 奠定了其在地质灾害研究领域的国际领先地位。

在过去的 20 a 中, 越来越多的新技术被应用到地质灾害的物理仿真实验中, 使得地质灾害物理仿真实验已经成为一个学科交叉、应用广泛、更新迅速的研究热点。2008 年“5·12”汶川地震触发了广泛的地质灾害, 造成了大量人员伤亡和经济损失, 引发了我国学者对于地质灾害形成机理、演化过程、风险防控等方面的高度重视[24]。各个科研院所加快了地质灾害相关实验室的组建并建设了大量地质灾害物理仿真设备, 有关地质灾害机理分析的物理仿真实验呈现出快速增长趋势[1, 25]。经过十几年的发展, 我国已经成为地质灾害物理仿真实验领域的主力军。本研究基于大量的文献调研而形成, 旨在为地质灾害物理仿真实验研究领域的相关从业人员提供系统性认识的同时, 并预测地质灾害物理仿真实验未来的发展方向, 进而为我国地质灾害物理仿真实验设计、相关设备的研发、关键技术更新提供有价值的参考。本研究包括 3 个部分, 第一部分论述地质灾害物理仿真实验的 5 个意义; 第二部分分别论述地质灾害物理仿真实验中 6 项关键技术的发展现状; 第三部分从 4 个方面预测地质灾害物理仿真实验未来的发展趋势。最后根据本研究的调研成果对地质灾害物理仿真实验的进一步发展提出一些建议。

1　地质灾害物理仿真实验的意义

1.1　灾害场景重现

以实际地质灾害事件为基础, 突出最显著地质特征的同时, 尽可能地简化模型并以相似定律为准则, 实现对真实地质灾害事件建模。然后依据灾害事件的驱动条件给物理模型施加相似的边界条件, 对灾害场景进行复现。这是地质灾害物理仿真实验的一个重要意义。但是基于物理仿真技术开展的灾害场景重现很难实现对地质灾害全过程地完美复现[26], 其主要目的是弥补灾害现场监测数据的不足[27]。因此灾害场景复现的内容更多的是地质体中变形开裂[28-30]、失稳垮塌[31-33]、侵蚀夹带[34]、分选堆积[35] 等灾害演化过程中的关键特征。在获取这些关键演化特征的参数与模式以后, 通过基于相似定律的反演分析, 实现对实际地质灾害的危险性评估, 进而为地质灾害复盘推演、现场防灾减灾等工作提供技术指导[36]。

1.2　启动机理分析

地质灾害物理仿真实验可以通过控制内外 2 个方面的因素, 揭示地质体变形破坏特征及其失稳机理。一方面是控制地质灾害外部驱动因素。主要利用仿真设备控制振动[5, 37-42]、库岸水位[43]、降雨[44-46]、构造应力[2]、河水流量[47] 等外部因素, 研究分析地质体对不同外部因素的响应特征。另一方面是控制地质灾害内部地质因素。通过地质体物理建模手段, 建立不同地质特征的地质体, 例如不同岩层[48-49]、不同岩土结构[50]、不同坡度[51]、不同初始含水率[52-53]、不同节理特征[54] 等。然后基于单因素或多因素控制分析开展对照实验, 揭示内部地质因素在地质体失稳过程中扮演的角色。

1.3　理论推导验证

地质灾害物理仿真实验的理论推导验证意义主要体现 2 个方面。第一方面是通过物理仿真实验实

现对地质灾害理论模型进行验证。地质灾害物理仿真实验可以帮助研究者验证理论模型[55-60]和推导关键参数的数学公式[61-67]，从而构建和完善地质灾害启动机制与演化过程的理论模型，有助于提高地质灾害预测的准确性和可靠性。第二个方面是通过物理仿真以及数值仿真的结果对照分析，实现对地质灾害数值模拟方法的验证。物理仿真实验可以看作是连接真实场景与数值模拟的一座桥梁[68]，复杂的数值模型往往需要大量数据进行校准和验证[69]，而物理仿真技术是在缩尺模型上研究地质体稳定性的一种高效的替代方案[70-72]，甚至有学者直接通过开展高成本的野外全尺度物理仿真实验来验证数值仿真模型[73]。

1.4 关键参数标定

物理仿真实验对于地质灾害研究中的关键参数标定意义可以体现在 2 个方面。第一个方面是标定驱动地质灾害的关键参数，为地质灾害的早期预警提供阈值选择的依据。可以通过对典型地质灾害开展物理仿真，确定地质灾害的内外部驱动因素，如土壤初始含水率[74]、库水位涨落速度[3]、降雨强度[75]等参数。通过建立关键参数的经验公式，为基于物理机制的地质灾害评估预警提供阈值确定的科学依据[76-78]。第二个方面是为数值仿真中的关键环节提供参数的设定依据，协助构建普适性的地质灾害数值仿真方法[72]。基于物理仿真实验建立数值仿真模型，通过对比二者的模拟结果，提出可以推广使用的地质灾害数值仿真方法[79]。

1.5 演化模式构建

利用物理仿真技术开展地质灾害演进模式构建的意义主要体现在 3 个方面。第一方面是重点模拟地质体启动过程，分析地质体变形演化特征，构建地质灾害失稳过程的演化模式，以期为地质灾害的前兆识别和灾前预防提供理论依据。这方面的主要研究内容包括边坡失稳模式构建[80-83]、堰塞坝溃决模式[33, 84]、泥石流启动模式[47, 85]等。第二方面重点模拟地质体失稳之后的运动过程，划分灾害演化阶段，从而构建地质灾害运动与演化模式。这方面的研究内容包括泥石流演进模式、高速远程滑坡运动与沉积模式[86-88]、堰塞坝堵溃演进模式[89-91]、地裂缝扩展模式[92]等。第三方面是对链生灾害演化模式构建的研究意义，通过物理仿真手段弥补地质灾害链关键结点演化过程的研究不足，建立地质灾害灾害链式演进模式，例如地震-滑坡-堰塞坝灾害链演进模式构建[93]、地震-泥石流-堰塞坝灾害链演进模式构建[77]、地震-堰塞坝溃决灾害链演进模式构建[94]。

2 地质灾害物理仿真实验关键技术发展现状

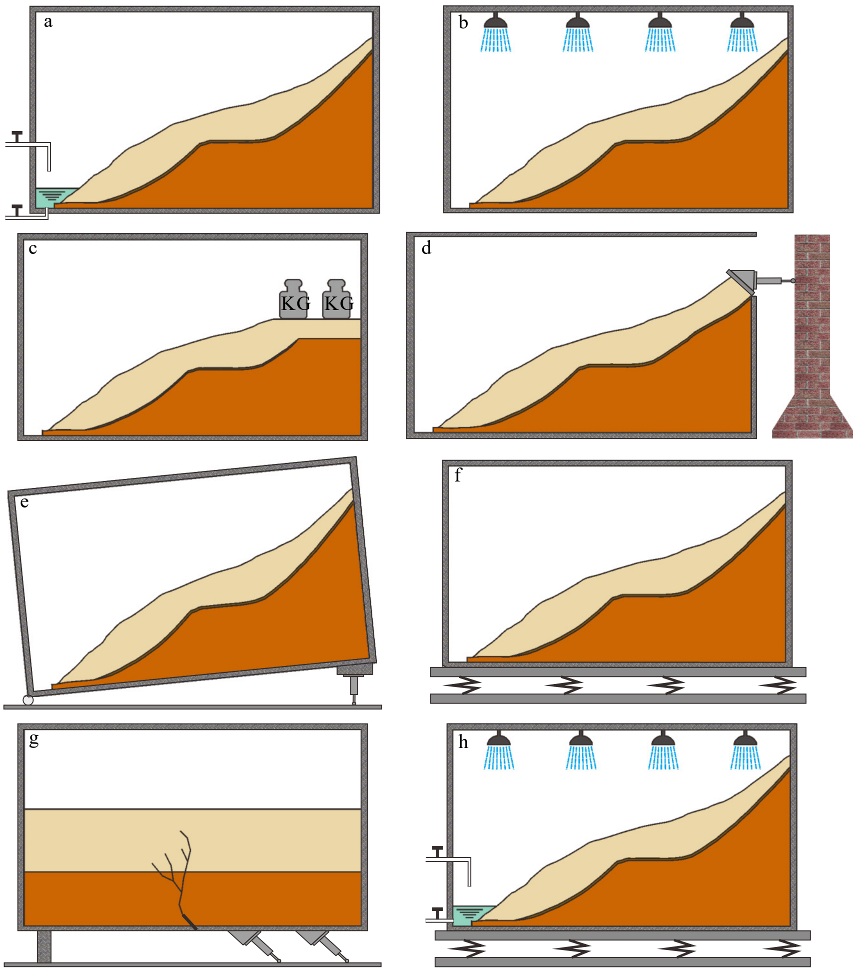
通过调研本研究总结出地质灾害物理仿真实验中被广泛使用的 6 个关键技术分别为模型箱仿真技术、水槽仿真技术、振动台仿真技术、底摩擦仿真技术、离心机仿真技术和原位仿真技术。下面分别分析这 6 个关键技术的发展现状，梳理地质灾害物理仿真实验的研究现状。

2.1 模型箱仿真技术

模型箱物理仿真技术是地质灾害物理仿真实验中采用最广泛的一种技术。它通过构建缩小尺度的地质模型，观察和研究地质模型的失稳过程，揭示实际地质体的灾变机制。大部分的模型箱采用钢架材料为框架，钢化玻璃[95]、透明树脂板[96]、亚克力[53, 97]等透明材料为填充的设计方式。模型箱仿真实验是在箱体空间内开展实验，受箱体空间限制，这一类实验以天然斜坡与人工边坡的失稳灾变过程分析为主，且多选择在外力作用下易破坏的边坡，最简单的方式是在模型顶部放置砝码或者背部施加载荷为地质体提供失稳外动力条件，也有与降雨[98-102]、水位升降[30, 103]、造浪[67]、振动台[22, 104]、离心机[105-106]等辅助设备联合使用，研究外动力对边坡稳定性的破坏机制[107]。在研究岩土体侧向位移时可以选水平剪切模型箱[108-110]，研究地面沉降或地裂缝扩展时可以使用垂直剪切模型箱[92, 111]。本研究将基于模型箱仿真技术的地质灾害物理实验划分为 8 种类型，各类型的示意图如图 2 所示。

可以看出，模型箱仿真技术可以独立开展实验，也可以和其他辅助设备协同开展多物理场耦合的地质灾害仿真实验，具有组合多样、价格低廉、安装简易、操作简单的特点。从仿真对象来看，模型箱仿真实验多针对包含有软弱面的边坡，例如顺层缓倾边坡、夹层边坡、陡倾边坡等。这一类边坡由于存在力学薄弱面，在外部载荷作用下易于破坏，破坏方式也较为可控，往往可以取得较为理想的仿真结果。此外，也有学者利用模型箱仿真技术模拟锁固段破坏特征，研究岩质滑坡的启动机制[112-113]。

模型箱仿真技术也存在自身的缺点，其中以箱体边界与模型接触造成的边界效应[114-115]、模型箱自重造成的输入效应[116]、模型缩尺造成的地震动频率



a. 水位驱动式; b. 降雨驱动式; c. 顶部压力驱动式; d. 后缘推力驱动式; e. 坡度驱动式; f. 地振动驱动式; g. 断层驱动式; h. 混合驱动式

图 2　不同类型地质灾害物理仿真模型箱实验示意图（据文献 [53，102-103，107，111] 修改）

Fig. 2　Schematic diagram of different types of simulation model box for geological hazards

不匹配效应最为常见的。大部分情况下，可以通过优化模型尺寸[117]、在箱体边界涂抹润滑材料、降低箱体重量等措施有效缓解。总体而言，模型箱模拟技术是一个较为成熟的地质灾害物理模拟方法，作为最基础的地质灾害物理仿真技术受到了许多高校和科研院所的青睐。

2.2　水槽仿真技术

水槽仿真技术系指通过设置一个或多个槽状设备，实现对灾害体启动、运动以及堆积过程的模拟。水槽仿真技术多应用在高位远程滑坡、泥石流、洪水、堰塞坝溃决等演进过程相对较长的地质灾害物理仿真实验中。与模型箱仿真技术类似，水槽仿真技术同样具备尺寸多样、安装简易的特点。小尺度水槽实验的实验成本低，实验可重复性强，可以开展多次对照实验，获得较为系统的实验数据。其中，以参考文献 [118-122] 代表，这些学者基于控制变量的研究思路，开展小型水槽的重复性实验，系统性地分析了地质体相对密度、坡度、土壤湿度等参数对滑坡、泥石流、尾矿边坡等灾害运动过程以及堆积规模的影响。但是小尺度水槽仿真实验在实验过程遭受尺度效应的影响程度明显高于大尺度水槽。因此相比而言，大尺度水槽实验可以更好地模拟岩土体的运动过程以及展布形态[123]。

早期的大型水槽实验以日本防灾所[124-125] 和美国 USGS[126-127] 为代表。近几年我国大尺度水槽实验高速发展，成都理工大学[128]、四川大学[84]、天津大学[129]、香港科技大学[130]、南京水利科学研究院[131] 等科研院所相继建成了长度在 20 m 以上的大型水槽实验设备并开展了泥石流、堰塞坝溃决、洪水演进等地质灾害仿真实验。也有学者既开展了小尺度实验又开展了大尺度实验，不同尺度的仿真实验组合分析，最大限度地减小了尺度效应的影响[132-133]。

水槽实验的另一个特点为样式灵活多变，实验设计受空间限制较小，可以根据实验需求开发不同形状、不同模块组合的水槽。例如，关注坡度特征的直斜式水槽[51, 85]、关注地形特征的多段式水

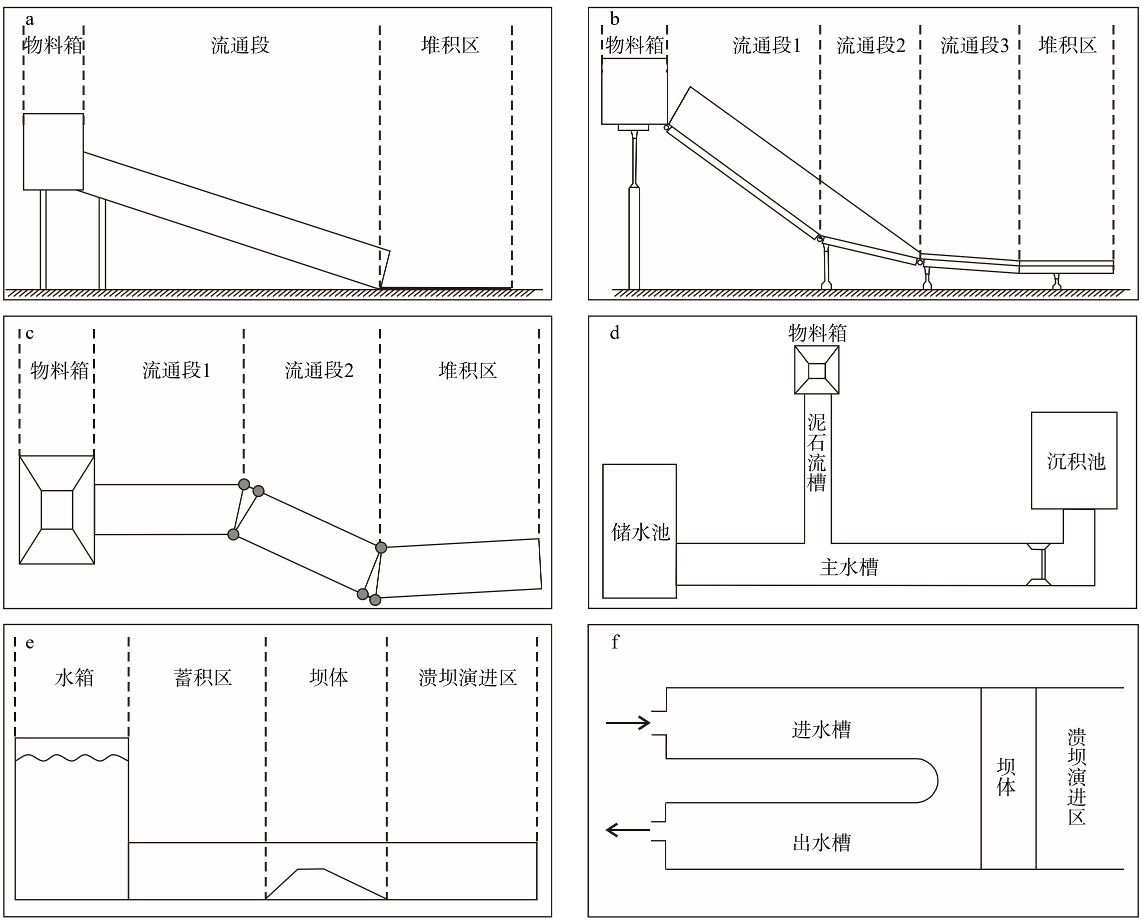
槽[134-135]、关注多灾害体相互作用的交叉式水槽[136]、关注灾害演进特征的弯曲式水槽[129]。通过调研本研究将水槽仿真实验划分为 6 种类型，各类水槽的示意图如图 3 所示。

可以看出，水槽仿真技术被广泛地应用于具有显著运动特征的地质灾害物理仿真中。但是这一类地质灾害，实际的灾害特征是，在地质体快速运动过程中碎屑流体与下伏滑床之间会产生强大的振动力和空气压力，使得碎屑流体产生气垫效应[138]。而在物理仿真中，多采用有机玻璃、塑料板、金属板等材料作为模型边界，难以重现碎屑流体与周围边界的摩擦、碰撞和激振作用[35]。这是水槽仿真实验难以避免的一大误差，即便增大模型尺寸，甚至开展全尺寸的物理仿真，依然难以得到和现实情况完全一致的物理仿真结果。但是对于灾害的演化模式构建以及堆积特征分析等方面，水槽仿真技术依然具有较大优势。

2.3 振动台仿真技术

振动台作为模拟地震和其他振动现象的重要设备，在实际操作中，振动台通过精确控制频率、振幅和持续时间等振动参数，为地质灾害物理仿真实验提供所需的振动环境，从而开展地质体动力响应方面的研究[139]。

振动台的尺寸多样，小型振动台降低了实验成本，便于开展多次实验，但是增加了缩尺实验的尺度效应[140-141]。大型振动台仿真实验除可以有效降低尺度效应，还可以同时开展多个模型的对比实验[142-143]，降低对照实验的系统误差。振动台仿真技术受台面形状限制，开展的地质灾害物理仿真实验以边坡的动力响应为主，包括土质边坡[144-146]、岩质边坡[26, 139, 147-151]、二元结构堆积体边坡[152-155]、非均质边坡[156-158]、路堤[159-160]、坝体[94] 等。但是，振动台具有开放式设计结构，有学者发挥这一优势把水槽安装到振动台上，开展了地震对岩崩[161]、滑坡体颗粒分选[162] 的影响分析。此外，已经有学者论证连续体模型箱在振动台阵上开展实验的可行性[163-164]，这为高速远程滑坡与泥石流灾害的物理仿真实验启发了思路，未来可能会见到利用振动台阵开展具有长距



a. 直斜式水槽；b. 变坡度式水槽；c. 变方向式水槽；d. 交叉式水槽；e. 水平式水槽；f. 环绕式水槽

图 3　不同类型地质灾害物理仿真水槽示意图（据文献 [51，77，90，129，134，137] 修改）

Fig. 3　Schematic diagram of different types of flume for geological hazards

离运动特征的地质灾害物理仿真实验。

振动台仿真为一个高度集成化、系统化的仿真技术，不可避免地存在一些缺陷。首先，不同于结构体的抗震实验，基于地质灾害的物理仿真实验往往需要借助模型箱、水槽等设备。实验过程中边界效应在振动实验中会进一步放大，并且如果模型箱重量过大，还会降低强震复现精度[165]。此外，重力失真、地震波输入压缩时间比等因素也会对仿真实验的结果造成一定影响。最后，振动台仿真技术成本高昂，包括设备投入、运行维护经济成本以及实验准备和执行的时间成本。尤其是大尺寸物理仿真实验，虽然降低了物理仿真实验的尺寸效应，提高了实验结果的可信度，但是实验成本却是研究人员设计实验时不得不考虑的因素。

我国振动台仿真技术起步较晚，但发展迅猛[166]。据不完全统计，目前我国建成的振动台超过 50 个，近半数开展过地质灾害物理仿真实验(表 1)，这表明虽然振动台仿真技术具有一定的缺陷与不足，但是其在地质灾害物理仿真实验中依然发挥着不可替代的作用。

2.4　底摩擦仿真技术

底摩擦仿真技术是利用模型与传送带之间的摩擦力代替重力，模拟地质体变形失稳的物理仿真技术。20 世纪 30 年代，著名工程地质学家 CLOOS 教授[168] 利用底部抽拉装置模拟了地堑形成过程。这一实验方式启发了 BRAY 等[169] 学者，他们基于此开发了底摩擦实验装置。图 4 为底摩擦实验的原理示意图，模型被平铺在 2 个传动轮支撑的传动皮带上，传动皮带在匀速运行时与模型的底部产生摩擦力，基于圣维南原理，可以用摩擦力代替重力，实现了仿真模型与重力场的耦合[172]。

由于底摩擦仿真技术设备简易、建模过程简单，利用较小的成本便可以给仿真实验叠加重力场，因此这一项技术被广泛应用在边坡的失稳机制分析中[12, 173]。但是摩擦实验装置难以耦合降雨、地振动等外力条件，大多用于自重作用下的边坡渐进破坏机制研究[174]。因此大部分底摩擦实验重点关注地质体的结构特征，开展包含力学薄弱面的地质体在重力场中的失稳破坏机制分析。例如，顺倾边坡破坏机制[170, 175]、反倾边坡破坏机制[176-177]、节理岩体破坏机制[178] 的分析。底摩擦实验的另一个特色是可根据实验情况随时暂停，除了便于观测实验过程的各个细节之外，还可以在实验暂停期间改变模型的结构与形状，分析人工开挖对边坡稳定性的扰动作用[172, 179-181]。底摩擦仿真技术的缺点也很明显，底摩擦实验大部分尺寸较小，并且在开展实验时，必须将仿真模型构造成二维平板模型平铺在实验台面上，这一实验方式直接限制了仿真模型的尺寸与空间维度，相比三维物理仿真实验而言实验结果存在一定程度的失真。

表 1　我国开展过基于振动台的地质灾害物理仿真实验的机构及实验类型

Table 1　Major Chinese institutions and corresponding types of table-based physical simulation experiments for geological hazard

机构	台面尺寸/(m×m)	实验类型	参考文献
西安建筑科技大学	4.1×4.1	加固边坡动力响应	文献[143]
成都理工大学	4.0×6.0	阶梯式顺层岩质动力响应	文献[40]
重庆交通科研设计院	3.0×6.0	不同岩性组合斜坡动力响应	文献[156]
兰州地震研究所	4.0×6.0	黄土边坡动力响应	文献[144]
中国水科院	5.0×5.0	台阶状岩质边坡动力响应	文献[148]
福州大学	4.0×4.0	二元结构边坡动力响应	文献[153]
武汉大学	2.0×2.0	加筋边坡动力响应	文献[160]
西南交通大学	3.0×2.0	不同含水率边坡动力响应	文献[145]
工程力学研究所	5.0×5.0	顺层岩质边坡动力响应	文献[26]
同济大学	4.0×4.0	堰塞坝动力响应	文献[94]
中南大学	4.0×4.0	层状岩质边坡动力响应	文献[149]
河南大学	3.0×3.0	岩质边坡动力响应	文献[147]
台湾大学	5.0×5.0	地震滑坡失稳机制	文献[104]
台湾交通大学	0.9×0.9	顺层倾斜边坡动力响应	文献[140]
中国核动力研究设计院	6.0×6.0	倾斜强风化层边坡动力响应	文献[142]
重庆大学	6.1×6.0	夹层型岩质边坡动力影响	文献[167]
信阳师范大学	3.0×3.0	顺层岩质边坡失稳机制	文献[38]
华北水利水电大学	3.0×3.0	顺层岩质边坡失稳机制	文献[157]

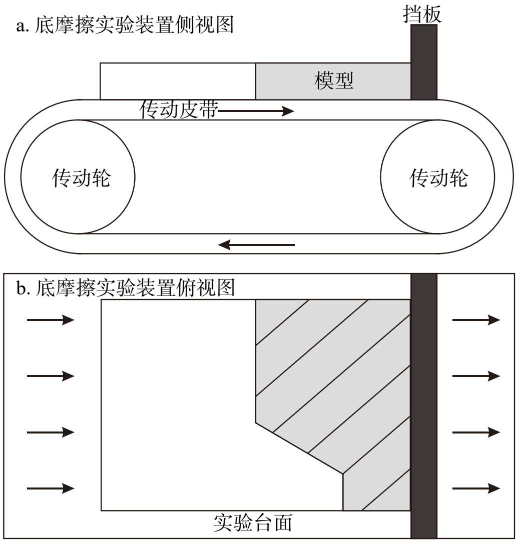


图 4　底摩擦仿真实验原理示意图（据文献 [170-171] 修改）

Fig. 4　Schematic diagram of the base friction simulation principle

2.5　离心机仿真技术

20 世纪 30 年代，地质力学离心机建模之父 PHILIP[182] 首次利用离心机开展了矿山顶板结构的完整性研究。经过了近一百年的发展，离心机模拟技术已经成为岩土工程领域一项重要的物理仿真技术[183-187]（表 2）。

离心机模拟技术的原理是利用离心加速度场补偿模型缩尺引起的自重应力损失，还原模型与原型之间应力–应变状态[25, 196, 201-203]。其优点在于，通过离心机的高速运转实现了模型应力水平与原型完全一致的相似性要求，原型土体和结构的受力变形特性包括破坏性状在理论上都可以在模型中得到逼真再现[105, 193]。目前，离心机模拟技术已在地质灾害物理仿真实验中得到了广泛应用[1]。尤其在地下水壅高[199, 204-206]、降雨入渗[52, 207-208]、灌溉入渗[209]、库区水位变化[210-216] 导致边坡变形破坏的研究中，离心机模拟技术更可以发挥其长处[200]。

离心机模拟技术同样存在缺陷。首先，离心机模拟技术利用高速转动提供的离心力来补偿由缩小模型尺度造成的重力缺失，在这一过程中无疑会放大模型与箱体之间的边界效应[217-218]。其次，离心机在高速旋转时，地质体垮塌和水流运动还会受到由旋转惯性产生的科里奥利力影响，因此有必要根据离心机的工程参数对实验结果进行误差矫正[68, 79, 219-221]。此外，离心机起动与制动时的加速和减速会引起切向加速度的变化，对实验结果造成一定影响[222]。最后，离心机模型实验成本较高、实验过程复杂，给这一类技术的大量推广造成了一定困难[223]。

2.6　原位仿真技术

地质灾害原位仿真技术是指在真实的地质环境中进行的仿真实验，旨在模拟地质灾害的发生过程以及对环境和人类造成的影响。这种实验通过搭建模拟场景或者使用数据采集装置对地质灾害的关键因素进行模拟和监测，以便更好地理解和预测地质灾害的发生和演化[224-230]。

地质灾害的室内物理仿真实验容易受到尺寸效

表 2　开展过基于离心机的地质灾害物理仿真实验的主要机构及实验类型

Table 2　Major institutions and experiment types for centrifuge-based physical simulation of geological hazards in China

机构	运行能力/(g·t)	实验类型	参考文献
成都理工大学	500	楔形体滑坡启动机制	文献[188]
南京水利科学研究	400	填石路堤振动响应	文献[83]
同济大学	150	降雨型沙土质滑坡失稳机制	文献[189]
清华大学	50	开挖过程中的边坡变形机制	文献[190]
西南交通大学	100	砂性土边坡失稳机制	文献[191]
浙江大学	400	堆积型滑坡振动响应	文献[105]
长江科学院	450	硬土软岩滑坡失稳机机制	文献[192]
香港科技大学	400	库岸古滑坡复活机制	文献[193]
英国剑桥大学	112.5	软黏土滑坡地振动响应	文献[194]
中国地震局工力所	300	降雨型滑坡启动机制	文献[25]
苏黎世联邦理工学院	500	泥石流的侵蚀和夹带行为	文献[195]
台湾中央大学	100	多场耦合下的滑坡失稳机制	文献[196]
英国诺丁汉大学	50	降雨型砂质边坡失稳机制	文献[75]
巴西UENF	100	海底滑坡滑水效应仿真	文献[197]
加拿大C-CORE	200	近海斜坡地振动影响	文献[198]
日本JNIOSH	50	水位变动下的滑坡失稳机制	文献[199]
美国UC Davis	240	不同土壤级配路堤振动响应	文献[200]

应、边界效应、仿真材料等因素的影响，对复杂受力和复杂边界等情况很难真实呈现。与室内物理仿真不同的，原位实验可以保持地质灾害的尺度和复杂性，还可以避免取样过程中对岩土体原状结构的破坏以及水分损失，因此原位仿真实验所取得的结果也更加符合真实情况[231-232]。

受限于控制工程、材料工程等学科发展，在地质灾害物理仿真实验的早期发展阶段，在地质灾害实际发育位置开展物理仿真实验是最简单有效的研究手段。这一阶段的原位仿真实验通常选择一个潜在的滑坡、泥石流隐患点，在隐患点上及其周围布置降雨量、含水量、位移等监测仪器，在自然降雨环境中实现对数据的采集与分析[8-9, 224-226, 233-234]。我国的地质灾害原位实验起步相对较早，1961 年中国科学院就在云南蒋家沟建立了野外观测站，采集了大量泥石流和滑坡野外观测资料[235-236]，并于 20 世纪末就利用消防车模拟降雨环境开展了滑坡启动机制研究[237]。随着大型人工降雨设备的引入，原位仿真实验不再局限于天气情况，降雨环境中的大型天然斜坡[238] 失稳实验、工程边坡失稳实验[239-240] 以及地面沉降实验[241] 等相继开展。此外，原位仿真技术较多应用在受地形控制较为明显的地质灾害物理仿真中，泥石流[242]、浅层滑坡[243]、坝体溃决与洪水演进[244-248] 等灾害的原位仿真实验往往可以取得较为理想的研究成果。

相比模型箱仿真、水槽仿真等缩尺实验，地质灾害原位仿真技术存在实验周期长、模型制作较难、人员投入较多、自动化程度较低、可重复性较差的问题。但是对于大型工程项目和国家级实验基地，建立地质灾害原位仿真实验场，不仅可以开展地质灾害原位运动学研究，还可以开展地质灾害力学实验和综合监测示范，可获取宝贵的第一手实验、测试和监测资料，进一步检验理论和数值分析的结果，有利于促进复杂条件下灾害体长期演化评价等方面的研究[21, 249]。这也代表了原位仿真实验在地质灾害研究中的发展方向。此外，大型地质灾害原位仿真实验场是极佳的科普教育基地，这对于促进地质灾害防灾减灾知识的普及与传播、加强公众安全教育、增强地质灾害风险防范意识、推动防灾减灾知识在社会中的传播与落地具有重要的现实意义。

3　地质灾害物理实验的发展趋势

3.1　场景构建复杂化

近几年地震前降雨[250-253]、地震后降雨[252, 254-255]、地震降雨复合[142, 256-259]、级联式堰塞坝溃决[132]、溃坝洪水演进[72]、滑坡涌浪[260]、地震冻融[261] 等复合灾害和链生灾害的物理仿真实验逐渐增多。这也对地质灾害物理仿真实验的设备更新以及实验设计提出了更高要求。比如在离心机模拟箱中安装加热灯泡的方法，实现了在原始重力场下边坡干湿循环实验[262]；通过在离心机中增加振动模块，实现了重力场与振动场的叠加耦合[233, 263-266]；通过在离心机中增加湿干冻融模块，实现了渗流场、重力场、振动场、温度场的多场叠加[188, 267]；通过把滑槽安装在振动台上，实现了振动环境中的高速远程滑坡运动过程分析[161]；在离心机上加装边坡开挖装置，模拟边坡开挖过程的变形破坏过程[190]。此外，由应急管理部国家自然灾害防治研究院建设的“灾害链物理仿真实验平台”预计将于 2027 年建成，该平台为复合链生地质灾害物理仿真实验平台，以“地震-滑坡-堵江-溃坝洪水”与“地震与降雨综合−崩塌、滑坡、洪涝、泥石流”等灾害链为研究对象，将有力推动我国在复合链生灾害物理仿真实验领域的研究水平。

在模型构建方面，由于实验技术手段所限制，目前大部分仿真实验对岩土体的结构面和形态进行简化处理，这种建模方法对地质灾害的机制研究具有重要的意义，但同时忽视了地质体的真实三维特征，如微地貌特征、非均质结构等，在进行地质灾害的全过程推演时可能出现失准。随着大型地质灾害物理仿真技术迭代以及考虑地质结构不确定性的地质体建模理论更新，针对三维边坡、三维结构面和复杂离散结构面的地质灾害物理仿真技术会逐渐成熟。

总体而言，地质灾害是一个多物理场耦合下的岩土体运动过程，随着地质灾害复合链生理论的逐渐完善，单一灾种的仿真已经难以满足现阶段的研究需求，多物理场耦合、多灾种复合的精细化地质灾害物理仿真实验将逐渐成为趋势。

3.2　实验规模大型化

虽然大规模物理仿真实验的成本很高，但是大尺寸的物理仿真模型可以显著降低模型缩尺带来的尺寸效应。此外，在大型地质灾害物理仿真实验中仿真材料更容易选择、模型边界条件更容易设置、监测设备更容易安装。因此大型物理仿真实验对于研究岩土体损伤机制以及灾害启动机理具有较大优势[123, 137, 268-269]。20 世纪末到 21 世纪初，美国和日本相继投资建设了多个大型物理仿真实验平台，例如日本 E-Defense 超大型振动台[17]、美国 USGS 泥石流仿真水槽[16]，这些设施在地质灾害物理仿真实验

中得到了充分的应用，并快速提升了日本和美国在地质灾害演化机理方面的研究水平。近些年，我国科研机构成为大型地质灾害仿真设备研发的主力军，除了前文提到的成都理工大学、四川大学、天津大学、香港科技大学等机构建立的大型水槽设备以外，天津大学研发建设的国家大型地震工程模拟设施(national facility for earthquake engineering simulation，简称NFEES)于2022年建成，台面尺寸达到了20 m×16 m，超越日本E-Defense成为世界上最大的地震工程模拟研究设施[270]；中国科学院、香港科技大学、中国电建集团联合研发的山地灾害大尺度动力学模拟实验平台(large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards，简称LEADS)于2023年底投入使用，该装置高差71.1 m，泄槽长约150 m、宽6 m、深4～5 m，能够模拟单次方量500 m^3的泥石流灾害，成为全球最大的山地灾害物理模拟实验平台[271]。当前，越来越多的大型物理仿真设备建成并投用，随着可完成大规模地质灾害仿真实验的机构与平台增多，未来地质灾害物理仿真实验的大型化将成为一大趋势。

3.3 材料选择科学化

物理模拟实验的基础是相似理论，要求模型能够反映原型的主要特征和实际情况，确保模型中的物理力学过程与原型中物理力学过程的相似性，其中相似材料的选择及其配比对模拟实验的成功与否起着关键性作用[272-276]。传统的仿真材料多以河沙、石英砂、重晶石粉、石膏粉等廉价、天然存在的模拟材料为主[4, 7, 277]，近年来，随着研究人员对物理实验精细度的不断追求以及材料科学的不断进步，铁粉、玻璃砂、硅粉等对于岩石力学性质(黏聚力、内摩擦角、密度等)更加敏感的材料逐渐被使用。在相似材料的设计方面，研究人员不仅仅考虑材料的力学属性，水稳性[278]、水敏性[279]等性质也成为了相似材料配置中被考虑到的物理属性。在脆性岩石的物理仿真实验中，已有学者利用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、丙烯酸共聚物(SR20)、树脂(Accura®60)等化学合成材料结合3D打印技术直接生成目标仿真材料[280-282]。此外，依托熔融石英砂、无定形硅胶粉和有机混合溶液等原材料配置的透明岩土或合成透明岩石等相似材料被应用在岩土体物理仿真实验中[283-291]，这极大地提高了地质灾害物理仿真实验的直观性与数据可获取性。在材料配比方案的确定方面，正交实验法[292-298]、均匀实验设计法[299-301]、控制变量法[302-305]、响应曲面设计方法[306]、模糊综合评判法[307-308]等方法的使用让相似材料的选择更具科学性。可以预见，随着材料科学的快速发展，地质灾害物理仿真实验相似材料的选择将不仅仅依靠经验判断与资料查阅，根据所模拟地质体的力学特征、结构特征以及敏感性特征，以丰富的岩土替代材料搭配科学的配比方法定制物理仿真相似材料是未来地质灾害物理仿真材料的发展趋势。

3.4 数据采集智能化

在地质灾害物理仿真实验中，渗压计、土压力计、裂缝计、加速度传感器等接触式数据采集仪器是必不可少的设备。除此之外，电阻率层析成像(electrical resistivity tomography，简称ERT)[309]、自然电位法[310]、光纤[311-312]、探地雷达[313]等数据采集技术实现了对仿真对象地质结构与位移的精细化探测。近些年随着高速摄像、数字图像相关技术(digital image correlation，简称DIC)[314]、粒子图像测速技术[315]、三维激光扫描[295, 316]、热红外[107]等技术的逐渐成熟，非接触式监测技术被越来越多地应用到地质灾害的物理仿真实验中[23]。这些技术的应用不仅减少了监测设备对实验过程的干扰，同时还提高了应力、应变、速度、加速度等参数的采集精度。尤其是在大尺度的地质灾害物理仿真实验中，非接触的数据采集设备可以避免设备损耗并且降低实验人员的安全风险。随着地质灾害物理仿真实验设计越来越复杂、规模越来越大，地质灾害物理仿真实验中的数据采集将更加智能化，先进的传感器、三维激光扫描技术和自动化控制系统的应用将会更加频繁，实现实验数据的远程、实时、快速、高精度收集与分析。

4 结 论

(1)地质灾害物理仿真实验的发展历史可以划分为3个阶段，分别是为以实地观察、简易原位实验、简易水槽实验和底摩擦实验等为主要手段的早期发展阶段(1980年及之前)；全球范围内关于自然灾害风险防范意识的提高以及相关学科发展带来的地质灾害物理仿真实验快速发展阶段(1990—2010年)；地质灾害理论、仿真实验设备、高性能数控软件以及高精度监测设备等领域全面更新带来的地质灾害物理仿真实验的综合发展阶段(2010年至今)。开展地质灾害物理仿真实验对于地质灾害机制机理研究以及防灾减灾工作具有重要的理论意义，具体包括5个方面，分别是灾害场景重建、启动机理分析、理论推导验证、关键参数标定和演化模式构建。

(2)模型箱仿真技术、水槽仿真技术、振动台仿真技术、底摩擦仿真技术、离心机仿真技术和原位仿真技术是地质灾害物理仿真实验中应用最多的6个关键技术。模型箱仿真技术和水槽仿真技术具有组合多样、价格低廉、操作简单的特点,可以独立开展实验,也可以和其他辅助设备协同使用,是目前应用最广泛的地质灾害物理仿真技术;底摩擦仿真技术设备简易、建模过程简单,利用较小的成本便可实现仿真模型与重力场的耦合,但只具备开展二维边坡模型仿真实验的能力;振动台仿真技术和离心机仿真技术的设备建设与使用成本高,但由于这2个技术可以为实验提供振动与重力环境,这2个技术在地质灾害物理仿真实验中依然是不可替代的,并且在近几年得到了大量建设与快速发展。相比其他技术,原位仿真技术具有实验周期长、模型制作难、人员投入多、自动化程度低、可重复性差的问题,但是在避免缩尺效应、边界效应、重力失真等方面则具有显著优势。

(3)未来地质灾害物理仿真实验将向着4个方面发展,分别是场景构建复杂化、实验规模大型化、材料选择科学化和数据采集智能化。目前我国的地质灾害物理仿真实验的相关理论与技术研究正在飞速发展,各大科研院所纷纷组建地质灾害物理仿真实验室,多个大型地质灾害仿真设备以及原位仿真实验场正在建设或已经投入使用,基本符合地质灾害物理仿真实验发展的4个方向。但是,随着地质灾害物理仿真实验场景构建的复杂化与实验规模的大型化,对物理仿真实验技术与经济成本提出了更高的要求,亟需加大对地质灾害物理仿真技术理论的研发资助以及相关人才的培养力度,营造涵盖理论体系建设、关键技术研发、实验设备制造、先进技术转化、专业人才培养、防灾科普教育的良性发展环境,为我国地质灾害关键理论创新提供丰富可靠的实验与数据基础。

所有作者声明不存在利益冲突。
The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1] FANG K, TANG H M, LI C D, et al. Centrifuge modelling of landslides and landslide hazard mitigation: A review[J]. Geoscience Frontiers, 2023, 14(1): 101493.

[2] GONG Y F, YAO A J, LI Y L, et al. Model test study on sliding-toppling composite deformation evolution of anti-dip layered rock slope[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(5): 194.

[3] 肖捷夫, 李云安, 蔡浚明. 水位涨落作用下藕塘滑坡响应特征模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1049-1056.
XIAO J F, LI Y A, CAI J M. Model test research on response characteristics of Outang landslide under water level fluctuation[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 1049-1056. (in Chinese with English abstract)

[4] 詹志发, 贺建先, 郑博文, 等. 边坡模型相似材料配比试验研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1236-1243.
ZHAN Z F, HE J X, ZHENG B W, et al. Experimental study on similar material proportion of slope model[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1236-1243. (in Chinese with English abstract)

[5] 许强, 刘汉香, 邹威, 等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2420-2428.
XU Q, LIU H X, ZOU W, et al. Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2420-2428. (in Chinese with English abstract)

[6] 郭长宝, 张永双, 刘定涛, 等. 基于离心机模型试验的甘肃江顶崖古滑坡复活机理研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(1): 164-176.
GUO C B, ZHANG Y S, LIU D T, et al. Centrifuge model test of reactivation mechanism of Jiangdingya ancient landslide in Gansu Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(1): 164-176. (in Chinese with English abstract)

[7] 苏占东, 周思哲, 王成虎, 等. 工程岩体物理模拟研究中实验材料的选择与应用[J]. 地质论评, 2023, 69(3): 1133-1149.
SU Z D, ZHOU S Z, WANG C H, et al. A review of the selection and application of experimental materials in the study of physical simulation of engineering rock masses[J]. Geological Review, 2023, 69(3): 1133-1149. (in Chinese with English abstract)

[8] SIDLE R C, SWANSTON D N. Analysis of a small debris slide in coastal Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(2): 167-174.

[9] YAGI N, YATABE R, ENOKI M. Laboratory and field experiments on prediction method of occuring time of slope failure due to rainfall[J]. Landslides, 1985, 22(2): 1-7.

[10] VAN STEUN H, COUTARD J P. Laboratory experiments with small debris flows: Physical properties related to sedimentary characteristics[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1989, 14(6): 587-596.

[11] AYDAN Ö, SHIMIZU Y, ICHIKAWA Y. The effective failure modes and stability of slopes in rock mass with two discontinuity sets[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1989, 22(3): 163-188.

[12] NISHIDA T, ESAKI T, KAMEDA N. A development of the base friction technique and its application to subsidence engineering[C]//Anon. Proceedings of the International Symposium on Engineering in Complex Rock Formations. Amsterdam: Elsevier, 1988: 386-392.

[13] 史培军, 郭卫平, 李保俊, 等. 减灾与可持续发展模式: 从第二次世界减灾大会看中国减灾战略的调整[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(3): 1-7.
SHI P J, GUO W P, LI B J, et al. Disaster reduction and sustain-

able development: Adjustment of disaster reduction strategies of China based on "The 2nd World Conference on Disaster Reduction, 2005"[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(3): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[14] BEER T. The natural hazards theme of the International Year of Planet Earth[J]. Natural Hazards, 2007, 42(3): 469-480.

[15] EIGENMANN R, HACKER T J, RATHJE E M. NEES cyberinfrastructure: A foundation for innovative research and education[C]//Anon. Proceedings of the 9th US/10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. [S. 1.]: [S. n.], 2010.

[16] IVERSON R M. Sensitivity of stability analyses to groundwater data[C]//Anon. The Sixth International Symposium on Landslides. [S. 1.]: CRC Press, 1992: 451-457.

[17] TAGAWA Y, KAJIWARA K. Controller development for the E-defense shaking table. Part I: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2007, 221(2): 171-181.

[18] VAN DEN EINDE L, CONTE J P, RESTREPO J I, et al. NHERI@UC San diego 6-DOF large high-performance outdoor shake table facility[J]. Frontiers in Built Environment, 2021, 6: 580333.

[19] 石菊松，吴树仁，张永双，等. 应对全球变化的中国地质灾害综合减灾战略研究 [J]. 地质论评，2012，58(2)：309-318.
SHI J S, WU S R, ZHANG Y S, et al. Integrated landslide mitigation strategies study for global change in China[J]. Geological Review, 2012, 58(2): 309-318. (in Chinese with English abstract)

[20] 张永双，孙璐，殷秀兰，等. 中国环境地质研究主要进展与展望 [J]. 中国地质，2017，44(5)：901-912.
ZHANG Y S, SUN L, YIN X L, et al. Progress and prospect of research on environmental geology of China: A review[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 901-912. (in Chinese with English abstract)

[21] TANG H M, LI C D, HU X L, et al. Evolution characteristics of the Huangtupo landslide based on in situ tunneling and monitoring[J]. Landslides, 2015, 12(3): 511-521.

[22] MA K, ZHANG Y M, WU H G, et al. Shaking table test study of accumulation layer landslide under earthquake action[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(2): 161.

[23] STANIER S A, BLABER J, TAKE W A, et al. Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(5): 727-739.

[24] 许冲，戴福初，徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述 [J]. 地质论评，2010，56(6)：860-874.
XU C, DAI F C, XU X W. Wenchuan earthquake-induced landslides: An overview[J]. Geological Review, 2010, 56(6): 860-874. (in Chinese with English abstract)

[25] 王永志，王体强，王海，等. 我国土工离心机进展与研发关键技术 [J]. 地震研究，2020，43(3)：592-600.
WANG Y Z, WANG T Q, WANG H, et al. Geotechnical centrifuge progress and key technologies in China[J]. Journal of Seismological Research, 2020, 43(3): 592-600. (in Chinese with English abstract)

[26] 董金玉，杨国香，伍法权，等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究 [J]. 岩土力学，2011，32(10)：2977-2982.
DONG J Y, YANG G X, WU F Q, et al. The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2977-2982. (in Chinese with English abstract)

[27] 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 M, YIN Y P, WU S R, 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)

[28] 潘皇宋，李天斌，伜拨云，等. 降雨条件下折线型滑面的大型滑坡稳定性离心模型试验 [J]. 岩土工程学报，2016，38(4)：696-704.
PAN H S, LI T B, WU B Y, et al. Centrifugal model tests on large-scale landslide with broken-line slip surface under rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 696-704. (in Chinese with English abstract)

[29] 孟生勇，江兴元，杨义，等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究 [J]. 水文地质工程地质，2023，50(1)：104-112.
MENG S Y, JIANG X Y, YANG Y, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 104-112. (in Chinese with English abstract)

[30] 李卓，何勇军，盛金保，等. 降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡模型试验研究 [J]. 岩土工程学报，2017，39(3)：452-459.
LI Z, HE Y J, SHENG J B, et al. Landslide model for slope of reservoir bank under combined effects of rainfall and reservoir water level[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 452-459. (in Chinese with English abstract)

[31] TAKE W A, BEDDOE R A. Physical modelling of rainfall-induced flow failures in loose granular soils[J]. IOP Conference Series (Earth and Environmental Science), 2015, 26(1): 012001.

[32] 冯振，殷跃平，李滨，等. 斜倾厚层岩质滑坡视向滑动的土工离心模型试验 [J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(5)：890-897.
FENG Z, YIN Y P, LI B, et al. Centrifuge modeling of apparent dip slide from oblique thick bedding rock landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 890-897. (in Chinese with English abstract)

[33] 杨阳，曹叔尤. 堰塞坝漫顶溃决与演变水槽试验指标初探 [J]. 四川大学学报(工程科学版)，2015，47(2)：1-7.
YANG Y, CAO S Y. Preliminary study on similarity criteria of the flume experiment on the breach process of the landslide dams by overtopping[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(2): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[34] DUFRESNE A. Granular flow experiments on the interaction with stationary runout path materials and comparison to rock avalanche events[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(14): 1527-1541.

[35] 郑光，许强，彭双麒. 滑坡-碎屑流的堆积特征及机理分析 [J]. 工

程地质学报，2019，27(4)：842-852.
ZHENG G，XU Q，PENG S Q. Mechanism analysis of the accumulation characteristics of rock avalanche[J]. Journal of Engineering Geology，2019，27(4)：842-852.（in Chinese with English abstract）

[36] 吴钟腾，冯文凯，朱继良. 云南省彝良县麻窝后山滑坡变形破坏机理离心机模拟试验 [J]. 水文地质工程地质，2014，41(4)：87-91.
WU Z T，FENG W K，ZHU J L. Centrifuge simulation test on deformation mechanism of landslide in the Mawo Mountain in Yiliang County，Yunnan Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology，2014，41(4)：87-91.（in Chinese with English abstract）

[37] ZHU C Q，CHENG H L，BAO Y J，et al. Shaking table tests on the seismic response of slopes to near-fault ground motion[J]. Geomechanics and Engineering，2022，29(2)：133-143.

[38] YANG C W，ZHANG L，LIU Y，et al. Shaking table test on dynamic response of bedding rock slopes with weak structural plane under earthquake[J]. Frontiers in Physics，2020，8：556714.

[39] 刘汉香，周逸飞，李欣. 层状复合岩体边坡动力特性及地震响应特性的振动台试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(4)：676-689.
LIU H X，ZHOU Y F，LI X. Shaking table test of dynamic responses of a layered complex rock slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2021，40(4)：676-689.（in Chinese with English abstract）

[40] 信春雷，杨飞，冯文凯，等. 多期地震作用的台阶式顺层岩质边坡震裂破坏机制 [J]. 岩土力学，2023，44(12)：3481-3494.
XIN C L，YANG F，FENG W K，et al. Shattering failure mechanism of step-like bedding rock slope under multi-stage earthquake excitations[J]. Rock and Soil Mechanics，2023，44(12)：3481-3494.（in Chinese with English abstract）

[41] YANG C W，CHEN G P，YUE M，et al. Shaking table test on damage mechanism of bedrock and overburden layer slope based on the time-frequency analysis method[J]. Scientific Reports，2024，14：12504.

[42] 詹志发，祁生文，何乃武，等. 强震作用下均质岩质边坡动力响应的振动台模型试验研究 [J]. 工程地质学报，2019，27(5)：946-954.
ZHAN Z F，QI S W，HE N W，et al. Shaking table test study of homogeneous rock slope model under strong earthquake[J]. Journal of Engineering Geology，2019，27(5)：946-954.（in Chinese with English abstract）

[43] 许艺林，李远耀，李思德，等. 库水位下降叠加降雨作用时堆积层滑坡渗流-变形机制 [J]. 地质科技通报，2024，43(1)：216-228.
XU Y L，LI Y Y，LI S D，et al. Seepage-deformation mechanism of colluvial landslides under the action of reservoir water level decline and rainfall[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2024，43(1)：216-228.（in Chinese with English abstract）

[44] 白永健，葛华，冯文凯，等. 乌蒙山区红层软岩滑坡地质演化及灾变过程离心机模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(增刊 1)：3025-3035.
BAI Y J，GE H，FENG W K，et al. Centrifugal tests on geological evolution and sliding process for red-bed soft rock landslide in Wumeng Mountain area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2019，38(S1)：3025-3035.（in Chinese with English abstract）

[45] LI Q Q，HUANG D，PEI S F，et al. Using physical model experiments for hazards assessment of rainfall-induced debris landslides[J]. Journal of Earth Science，2021，32(5)：1113-1128.

[46] 刘洪华，武闻禹，王志朋，等. 基于大型物理模型试验的强降雨诱发全风化花岗岩滑坡失稳分析 [J]. 科学技术与工程，2023，23(27)：11530-11539.
LIU H H，WU W Y，WANG Z P，et al. Analysis of landslide instability of weathered granite induced by heavy rainfall based on large-scale physical model test[J]. Science Technology and Engineering，2023，23(27)：11530-11539.（in Chinese with English abstract）

[47] 樊圆圆，宋玲，魏学利. 基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析：以中巴公路艾尔库然沟为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报，2021，32(1)：1-9.
FAN Y Y，SONG L，WEI X L. Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test：A case study of the Aierkuran gully along the Sino-Pakistan Highway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，2021，32(1)：1-9.（in Chinese with English abstract）

[48] 龚柏城，苑久超，王磊，等. 软硬岩互层反倾高边坡变形破坏过程物理模型试验研究 [J]. 地质灾害与环境保护，2024，35(1)：87-95.
GONG B C，YUAN J C，WANG L，et al. Experimental study on physical model of deformation evolution mode of high slope with reverse dip of soft and hard rock[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation，2024，35(1)：87-95.（in Chinese with English abstract）

[49] 翟淑花，于家烁，齐干，等. 降雨入渗条件下堆积体边坡致灾因子试验分析 [J]. 地质科技通报，2023，42(3)：9-15.
ZHAI S H，YU J S，QI G，et al. Triggering factor analysis of deposit slope under rainfall infiltration based on laboratory experiments[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2023，42(3)：9-15.（in Chinese with English abstract）

[50] 吴茂林，罗刚，高延超，等. 正反粒序结构条件下滑坡堰塞坝破坏模式研究 [J]. 水文地质工程地质，2022，49(6)：124-132.
WU M L，LUO G，GAO Y C，et al. A study of the failure mode of landslide dam under the structural conditions of positive and reverse grain sequences[J]. Hydrogeology & Engineering Geology，2022，49(6)：124-132.（in Chinese with English abstract）

[51] 雷先顺，朱大勇，刘诚，等. 考虑滑道坡度和宽度的滑坡模型试验研究 [J]. 岩土力学，2017，38(5)：1281-1288.
LEI X S，ZHU D Y，LIU C，et al. Model test study of the effect of slope angle and chute width on landslide[J]. Rock and Soil Mechanics，2017，38(5)：1281-1288.（in Chinese with English abstract）

[52] GUO C B，ZHANG Y S，YUAN H，et al. Study of an ancient landslide reactivation mechanism based on centrifuge model testing：An example of the Jiangdingya ancient landslide reactivation in 2018，Gansu Province，China[J]. Landslides，2023，20(1)：127-141.

[53] 岳建军，林锋，吉世祖，等. 缓倾外软硬互层型斜坡启滑前地下水压力分布特征物理模拟研究 [J]. 科学技术与工程，2015，15(33)：132-136.
YUE J J, LIN F, JI S Z, et al. Study on physical simulation of groundwater pressure distribution on critical-sliding landslide with interbedded soft and hard rock beddings of low dip angles[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(33): 132-136. (in Chinese with English abstract)

[54] 陈国庆，秦昌安，魏涛，等. 岩质边坡阶梯状破坏及岩桥破裂机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(4)：809-821.
CHEN G Q, QIN C A, WEI T, et al. Study on the stepped failure of rock slopes and fracture mechanism of rock bridges[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(4): 809-821. (in Chinese with English abstract)

[55] 赵晨，谢谟文，杜岩，等. 倾倒型危岩体空间振动特征及损伤识别 [J]. 工程科学与技术，2024，56(5)：48-59.
ZHAO C, XIE M W, DU Y, et al. Spatial vibration characteristics and damage identification of toppling dangerous rock mass[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(5): 48-59. (in Chinese with English abstract)

[56] FENG Z, YIN Y P, LI B, et al. Physical modeling of landslide mechanism in oblique thick-bedded rock slope: A case study[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2013, 87(4): 1129-1136.

[57] 岳志远，曹志先，闫军. 滑坡体溃决洪水数学模型研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑，2008，23(5)：492-500.
YUE Z Y, CAO Z X, YAN J. Numerical modeling of breach of landslide dams[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(5): 492-500. (in Chinese with English abstract)

[58] 朱兴华，崔鹏，周公旦，等. 稀性泥石流冲刷规律的试验研究 [J]. 水利学报，2012，43(增刊 2)：85-91.
ZHU X H, CUI P, ZHOU G D, et al. Experimental study on the erosion law of diluted debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(S2): 85-91. (in Chinese with English abstract)

[59] TAN D Y, YIN J H, FENG W Q, et al. New simple method for measuring impact force on a flexible barrier from rockfall and debris flow based on large-scale flume tests[J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105881.

[60] 冯振，殷跃平，蔡奇鹏，等. 斜倾厚层山体滑坡启动机制的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(增刊 1)：2600-2604.
FENG Z, YIN Y P, CAI Q P, et al. Modeling test on initiation mechanism of landslide in oblique inclined thick-bedded mountain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2600-2604. (in Chinese with English abstract)

[61] EGASHIRA S, HONDA N, ITOH T. Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part C (Solar, Terrestrial & Planetary Science), 2001, 26(9): 645-650.

[62] GREGORETTI C. The initiation of debris flow at high slopes: Experimental results[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(2): 83-88.

[63] TAKAHASHI T. A review of Japanese debris flow research[J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2009, 2(1): 1-14.

[64] TAKAHASHI T. Mechanical characteristics of debris flow[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1978, 104(8): 1153-1169.

[65] OKURA Y, KITAHARA H, SAMMORI T, et al. The effects of rockfall volume on runout distance[J]. Engineering Geology, 2000, 58(2): 109-124.

[66] 王兆印. 泥石流龙头运动的实验研究及能量理论 [J]. 水利学报，2001，32(3)：18-26.
WANG Z Y. Experimental study on debris flow head and the energy theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(3): 18-26. (in Chinese with English abstract)

[67] WANG L, GUO F, WANG S M. Prediction model of the collapse of bank slope under the erosion effect of wind-induced wave in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(18): 421.

[68] JAYAKODY S H S, UZUOKA R, UEDA K, et al. Unsaturated slopes behavior under antecedent intermittent rainfall patterns: Centrifuge and numerical study[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(11): 5773-5790.

[69] WU W. Recent advances in simulating landslide and debris flow[C]//Czech Geotechnical Society of the Czech Institution of Civil Engineers. 47th Conference Foundation Engineering. [S. 1.]: [S. n.], 2020: 30-34.

[70] ABUHAJAR O, EL NAGGAR H, NEWSON T. Experimental and numerical investigations of the effect of buried box culverts on earthquake excitation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 79: 130-148.

[71] QI S W, HE J X, ZHAN Z F. A single surface slope effects on seismic response based on shaking table test and numerical simulation[J]. Engineering Geology, 2022, 306: 106762.

[72] ZHANG J Y, YANG X G, FAN G, et al. Physical and numerical modeling of a landslide dam breach and flood routing process[J]. Journal of Hydrology, 2024, 628: 130552.

[73] TAKAYAMA S, MIYATA S, FUJIMOTO M, et al. Numerical simulation method for predicting a flood hydrograph due to progressive failure of a landslide dam[J]. Landslides, 2021, 18(11): 3655-3670.

[74] 雨德聪，丁攀，杨志全，等. 初始含水率对黄土滑坡堰塞坝溃决影响研究 [J]. 山地学报，2021，39(3)：367-377.
YU D C, DING P, YANG Z Q, et al. Study on the influence of initial water content on the breakout of loess landslide barrier dam[J]. Mountain Research, 2021, 39(3): 367-377. (in Chinese with English abstract)

[75] MATZIARIS V, MARSHALL A M, HERON C M, et al. Centrifuge model study of thresholds for rainfall-induced landslides in sandy slopes[J]. IOP Conference Series (Earth and Environmental Science), 2015, 26(1): 012032.

[76] CHEN Y L, IRFAN M, UCHIMURA T, et al. Development of elastic wave velocity threshold for rainfall-induced landslide prediction and early warning[J]. Landslides, 2019, 16(5): 955-968.

[77] 刘翠容，姚令侃，杜翠，等. 震后灾区泥石流阻塞大河判据与成灾模式试验研究 [J]. 土木工程学报，2013，46(增刊 1)：146-152.
LIU C R, YAO L K, DU C, et al. Experimental research on criteria and disaster-forming patterns of damming large river by debris

flow in earthquake disaster areas[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 146-152. (in Chinese with English abstract)

[78] 仉义星,兰恒星,李郎平,等. 综合统计模型和物理模型的地质灾害精细评估:以福建省龙山社区为例 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 608-622.
ZHANG Y X, LAN H X, LI L P, et al. Combining statistical model and physical model for refined assessment of geological disaster: A case study of Longshan Community in Fujian Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 608-622. (in Chinese with English abstract)

[79] ZHANG L C, ZHONG Q M, YANG M, et al. Centrifugal model tests and numerical modeling on overtopping-induced breach processes of landslide dams[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1062981.

[80] 吕艳,周泽华,刁钰恒,等. 秦岭甘湫池花岗岩质崩塌振动台试验研究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1373-1386.
LÜ Y, ZHOU Z H, DIAO Y H, et al. Large scale shaking table test of Ganqiuchi granite rock avalanche in Qinlin Mountains[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1373-1386. (in Chinese with English abstract)

[81] 穆成林,张御阳,裴向军,等. 反倾层状斜坡破裂面演化特征离心机模型试验与数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 135-144.
MU C L, ZHANG Y Y, PEI X J, et al. Centrifuge model test and numerical simulation on evolution characteristics of fracture surface of the anti-dipped layered slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 135-144. (in Chinese with English abstract)

[82] MAGHSOUDI M S, JAMSHIDI CHENARI R, FARROKHI F. A multilateral analysis of slope failure due to liquefaction-induced lateral deformation using shaking table tests[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(8): 1427.

[83] JING H J, GOU M J, ZHANG Y Q, et al. Investigation on the settlement of high rockfill embankment using centrifuge tests[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 547991.

[84] 谢忱,李从江,杨兴国,等. 基于物理模型试验的堰塞坝冲刷溃决过程研究 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(6): 43-53.
XIE C, LI C J, YANG X G, et al. Erosion and breach of landslide dam based on physical model tests[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(6): 43-53. (in Chinese with English abstract)

[85] 徐友宁,曹琰波,张江华,等. 基于人工模拟试验的小秦岭金矿区矿渣型泥石流起动研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1388-1395.
XU Y N, CAO Y B, ZHANG J H, et al. Research on starting of mine debris flow based on artificial simulation experiment in Xiaoqinling gold ore area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1388-1395. (in Chinese with English abstract)

[86] 周月,廖海梅,甘滨蕊,等. 滑坡运动冲击破碎物理模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 726-735.
ZHOU Y, LIAO H M, GAN B R, et al. Physical modeling test on impacting fragmentation during landslide moving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 726-735. (in Chinese with English abstract)

[87] 张恩铭,程谦恭,林棋文,等. 岩体结构对岩质滑坡运动过程和堆积特征的影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 125-135.
ZHANG E M, CHENG Q G, LIN Q W, et al. A study of the influence of rock mass structure on the propagation processes and deposit characteristics of rockslides[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 125-135. (in Chinese with English abstract)

[88] MANZELLA I, LABIOUSE V. Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation[J]. Landslides, 2013, 10(1): 23-36.

[89] 黄杰,党超. 卡口地形段泥石流堵塞效应分析:以四川什邡桦头尖泥石流沟域为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 48-57.
HUANG J, DANG C. Blocking effect of debris flow in the segment of bayonet terrain: A case study at the Huatoujian gulley of Shefang, Sichuan[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 48-57. (in Chinese with English abstract)

[90] 吕立群,周冠宇,马超,等. 古沉积盆地下切引发的泥石流侵蚀和波状流动耦合过程 [J]. 地球科学, 2023, 48(9): 3389-3401.
LÜ L Q, ZHOU G Y, MA C, et al. Coupling process of debris flow erosion and wavy flow caused by incision on paleosedimentary basin[J]. Earth Science, 2023, 48(9): 3389-3401. (in Chinese with English abstract)

[91] 陈华勇,崔鹏,唐金波,等. 堵塞坝溃决对上游来流及堵塞模式的响应 [J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1148-1157.
CHEN H Y, CUI P, TANG J B, et al. The response of upstream flow and blockage patterns to the failure of landslide dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(10): 1148-1157. (in Chinese with English abstract)

[92] 彭建兵,陈立伟,黄强兵,等. 地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1826-1834.
PENG J B, CHEN L W, HUANG Q B, et al. Large-scale physical simulative experiment on ground-fissure expansion mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1826-1834. (in Chinese with English abstract)

[93] 董金玉,杨继红,伍法权,等. 顺层岩质边坡加速度响应规律和滑动堵江机制大型振动台试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3861-3867.
DONG J Y, YANG J H, WU F Q, et al. Large-scale shaking table test research on acceleration response rules of bedding layered rock slope and its blocking mechanism of river[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3861-3867. (in Chinese with English abstract)

[94] 石振明,王友权,彭铭,等. 余震作用下堰塞坝体破坏及溃决过程大型振动台试验研究 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 71-77.
SHI Z M, WANG Y Q, PENG M, et al. Large scale shaking table tests on failure and breach process of landslide dams under aftershocks[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 71-77. (in Chinese with English abstract)

[95] 周昌，胡新丽，徐楚，等. 三峡库区滑坡消涨带变形破坏模型试验 [J]. 中国公路学报，2018，31（2）：252-260.
ZHOU C, HU X L, XU C, et al. Model test on deformation and failure of landslide in water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir region[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31（2）：252-260.（in Chinese with English abstract）
[96] 亓星，陶叶青. 甘肃黑方台突发型黄土滑坡形成过程的物理模拟 [J]. 科学技术与工程，2020，20（16）：6357-6361.
QI X, TAO Y Q. Physical simulation on the forming process of sudden loess landslide in Heifangtai, Gansu Province[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20（16）：6357-6361.（in Chinese with English abstract）
[97] 刘世康，范宣梅，王文松，等. 降雨模式对震后泥石流起动模式影响的试验研究：以九寨天堂沟为例 [J]. 地质科技通报，2022，41（6）：278-286.
LIU S K, FAN X M, WANG W S, et al. Experimental study on the effect of rainfall patterns on the failure mode of debris flows after earthquakes：A case study of Tiantanggou, Jiuzhai[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41（6）：278-286.（in Chinese with English abstract）
[98] 赵建军，余建乐，解明礼，等. 降雨诱发填方路堤边坡变形机制物理模拟研究 [J]. 岩土力学，2018，39（8）：2933-2940.
ZHAO J J, YU J L, XIE M L, et al. Physical model studies on fill embankment slope deformation mechanism under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39（8）：2933-2940.（in Chinese with English abstract）
[99] 王如宾，夏瑞，徐卫亚，等. 滑坡堆积体降雨入渗过程物理模拟试验研究 [J]. 工程科学与技术，2019，51（4）：47-54.
WANG R B, XIA R, XU W Y, et al. Study on physical simulation of rainfall infiltration process of landslide accumulation body[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51（4）：47-54.（in Chinese with English abstract）
[100] 石振明，赵思奕，苏越. 降雨作用下堆积层滑坡的模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质，2016，43（4）：135-140.
SHI Z M, ZHAO S Y, SU Y. An experimental study of the deposit slope failure caused by rainfall[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43（4）：135-140.（in Chinese with English abstract）
[101] WU L Z, HUANG R Q, XU Q, et al. Analysis of physical testing of rainfall-induced soil slope failures[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73（12）：8519-8531.
[102] WU L Z, ZHANG L M, ZHOU Y, et al. Theoretical analysis and model test for rainfall-induced shallow landslides in the red-bed area of Sichuan[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77（4）：1343-1353.
[103] JIANG Z H, WANG H L, XIE W. Deformation mechanism of deposit landslide induced by fluctuations of reservoir water level based on physical model tests[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80（11）：410.
[104] WANG K L, LIN M L. Initiation and displacement of landslide induced by earthquake：A study of shaking table model slope test[J]. Engineering Geology, 2011, 122（1/2）：106-114.
[105] 涂杰文，刘红帅，汤爱平，等. 基于离心振动台的堆积型滑坡加速度响应特征 [J]. 岩石力学与工程学报，2015，34（7）：1361-1369.
TU J W, LIU H S, TANG A P, et al. Acceleration response of colluvial landslide based on centrifugal shaking table test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34（7）：1361-1369.（in Chinese with English abstract）
[106] 杨庆华，姚令侃，任自铭，等. 地震作用下松散体斜坡崩塌动力学特性离心模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2008，27（2）：368-374.
YANG Q H, YAO L K, REN Z M, et al. Centrifugal model test on dynamical characteristics of landslips of loose slope under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27（2）：368-374.（in Chinese with English abstract）
[107] MA J W, TANG H M, HU X L, et al. Model testing of the spatial-temporal evolution of a landslide failure[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76（1）：323-339.
[108] TURAN A, HINCHBERGER S D, EL NAGGAR H. Design and commissioning of a laminar soil container for use on small shaking tables[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29（2）：404-414.
[109] PRASAD S K, TOWHATA I, CHANDRADHARA G P, et al. Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering[J]. Current Science, 2004, 87（10）：1398-1404.
[110] 陈国兴，王志华，左熹，等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制 [J]. 岩土工程学报，2010，32（1）：89-97.
CHEN G X, WANG Z H, ZUO X, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32（1）：89-97.（in Chinese with English abstract）
[111] 于文才，杨亚磊，卢全中，等. 不同活动速率下隐伏地裂缝的模型试验研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报，2019，30（2）：98-105.
YU W C, YANG Y L, LU Q Z, et al. Comparative study on physical model test of concealed ground fissure rupture propagation under different activity rates[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30（2）：98-105.（in Chinese with English abstract）
[112] HUANG R Q, CHEN G Q, GUO F, et al. Experimental study on the brittle failure of the locking section in a large-scale rock slide[J]. Landslides, 2016, 13（3）：583-588.
[113] 唐鹏，陈国庆，黄润秋，等. 基于物理模拟试验的岩质滑坡地表位移分析 [J]. 水文地质工程地质，2017，44（4）：105-110.
TANG P, CHEN G Q, HUANG R Q, et al. Surface displacement analysis of rock slope based on physical simulation tests[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44（4）：105-110.（in Chinese with English abstract）
[114] 袁林娟，刘小生，汪小刚，等. 振动台土-箱结构模型动力特性及反应的解析分析 [J]. 岩土工程学报，2012，34（6）：1038-1042.
YUAN L J, LIU X S, WANG X G, et al. Analytic solution of dynamic characteristics and responses of soil-box model for shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34（6）：1038-1042.（in Chinese with English abstract）
[115] 谢军，倪雅静，胡英飞，等. 振动台试验模型箱的研究进展 [J]. 现代隧道技术，2021，58（4）：79-85.

XIE J, NI Y J, HU Y F, et al. Research progress on the model box for shaking table tests[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(4): 79-85. (in Chinese with English abstract)

[116] 李常青,刘吉龙,蒋丽忠. 重力失真和质量失真对缩尺试验误差的理论分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3616-3624.
LI C Q, LIU J L, JIANG L Z. Theoretical analysis of gravity distortion and mass distortion to scale test error[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9): 3616-3624. (in Chinese with English abstract)

[117] 亢佳乐,卢全中,占洁伟,等. 隐伏地裂缝破裂扩展物理模型试验边界效应 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 941-954.
KANG J L, LU Q Z, ZHAN J W, et al. Boundary effect of physical model tests on rupture propagation of buried ground fissures[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 941-954. (in Chinese with English abstract)

[118] WANG G H, SASSA K. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: Effects of grain size and fine-particle content[J]. Engineering Geology, 2003, 69(1/2): 109-125.

[119] D'AGOSTINO V, CESCA M, MARCHI L. Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (eastern Italian Alps)[J]. Geomorphology, 2010, 115(3/4): 294-304.

[120] ZHANG X Y, HU W, ZHENG Y S, et al. Effects of relative density in progressive sliding of tailings deposits: Insights from flume tests[J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105908.

[121] HU W, XU Q, VAN ASCH T W J, et al. Flume tests to study the initiation of huge debris flows after the Wenchuan earthquake in S-W China[J]. Engineering Geology, 2014, 182: 121-129.

[122] 郝明辉,许强,杨磊,等. 滑坡-碎屑流物理模型试验及运动机制探讨 [J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊1): 127-132.
HAO M H, XU Q, YANG L, et al. Physical modeling and movement mechanism of landslide-debris avalanches[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S1): 127-132. (in Chinese with English abstract)

[123] IVERSON R M. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments[J]. Geomorphology, 2015, 244: 9-20.

[124] MORIWAKI H, INOKUCHI T, HATTANJI T, et al. Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator[J]. Landslides, 2004, 1(4): 277-288.

[125] OCHIAI H, SAMMORI T, OKADA Y. Landslide experiments on artificial and natural slopes[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 209-226.

[126] IVERSON R M, REID M E, LOGAN M, et al. Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment[J]. Nature Geoscience, 2010, 4(2): 116-121.

[127] IVERSON R M, LOGAN M, LAHUSEN R G, et al. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments[J]. Journal of Geophysical Research (Earth Surface), 2010, 115: F03005.

[128] 王东坡,陈政,何思明,等. 泥石流冲击桥墩动力相互作用物理模型试验 [J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3363-3372.
WANG D P, CHEN Z, HE S M, et al. Physical model experiments of dynamic interaction between debris flow and bridge pier model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3363-3372. (in Chinese with English abstract)

[129] 刘昉,戚园春,吴敏睿. 冻土条件下均质土堤漫顶溃决试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 21-27.
LIU F, QI Y C, WU M R. Experimental study on erosion process of homogeneous embankment breaching due to overtopping under frozen soil condition[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 21-27. (in Chinese with English abstract)

[130] NG C W W, LEONARDI A, MAJEED U, et al. A physical and numerical investigation of flow-barrier interaction for the design of a multiple-barrier system[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2023, 149(1): 04022122.

[131] 成泽霖,夏云峰,徐华,等. 滑坡堰塞坝漫顶溃决对外部动力条件的响应机制 [J]. 水科学进展, 2024, 35(4): 657-668.
CHENG Z L, XIE Y F, XU H, et al. Study on the response mechanism of landslide dam failure to external dynamic condition[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(4): 657-668. (in Chinese with English abstract)

[132] HU W, LI Y, FAN Y, et al. Flow amplification from cascading landslide dam failures: Insights from flume experiments[J]. Engineering Geology, 2022, 297: 106483.

[133] KIM B J, CHOI C E, YUNE C Y. Multi-scale flume investigation of the influence of cylindrical baffles on the mobility of landslide debris[J]. Engineering Geology, 2023, 314: 107012.

[134] YANG H Q, XING S G, WANG Q, et al. Model test on the entrainment phenomenon and energy conversion mechanism of flow-like landslides[J]. Engineering Geology, 2018, 239: 119-125.

[135] 葛云峰,李信杰,杜彬,等. 多功能高速远程滑坡运动堆积过程物理模型试验装置设计与应用 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 86-94.
GE Y F, LI X J, DU B, et al. Design and application of multifunctional physical model test device for movement and accumulation process of rapid long-runout landslide[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1): 86-94. (in Chinese with English abstract)

[136] 王涓,宋丽婧,刘轶,等. 滑坡碎屑流运动及堵江堰塞体堆积特性模型试验 [J]. 人民长江, 2023, 54(2): 191-199.
WANG J, SONG L J, LIU Y, et al. Model experiment study on dynamic process of landslide debris and deposition characteristics of barrier body[J]. Yangtze River, 2023, 54(2): 191-199. (in Chinese with English abstract)

[137] LEE K, SUK J, KIM H, et al. Modeling of rainfall-induced landslides using a full-scale flume test[J]. Landslides, 2021, 18(3): 1153-1162.

[138] 邢爱国,殷跃平,齐超,等. 高速远程滑坡气垫效应的风洞模拟试验研究 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(10): 1642-1646.
XING A G, YIN Y P, QI C, et al. Study on the wind tunnel testing of air cushion effect of high-speed and long-runout landslide[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(10): 1642-1646. (in Chinese with English abstract)

[139] DONG J Y, WANG C, HUANG Z Q, et al. Shaking table model

test to determine dynamic response characteristics and failure modes of steep bedding rock slope[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(6): 3645-3658.

[140] LIN C H, LI H H, WENG M C. Discrete element simulation of the dynamic response of a dip slope under shaking table tests[J]. Engineering Geology, 2018, 243: 168-180.

[141] 葛康, 陈世鸣. 大缩尺模型振动台试验误差分析 [J]. 结构工程师, 2017, 33(5): 154-161.
GE K, CHEN S M. Error analysis of large-scale down model shaking table test[J]. Structural Engineers, 2017, 33(5): 154-161. (in Chinese with English abstract)

[142] CAO L C, ZHANG J J, WANG Z J, et al. Dynamic response and dynamic failure mode of the slope subjected to earthquake and rainfall[J]. Landslides, 2019, 16(8): 1467-1482.

[143] LI N, MEN Y M, YUAN L Q, et al. Seismic response of micro-piles-reinforced landslide based on shaking table test[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 2030-2050.

[144] 王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 地震和降雨耦合作用下黄土边坡动力响应的振动台试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1287-1293.
WANG L M, PU X W, WU Z J, et al. Shaking table tests on dynamic response of loess slopes under coupling effects of earthquakes and rainfalls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1287-1293. (in Chinese with English abstract)

[145] 杨兵, 孙明祥, 王润民, 等. 土体含水率对边坡动力破坏模式及动力响应影响的振动台试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(4): 759-766.
YANG B, SUN M X, WANG R M, et al. Shaking table tests on influences of water content of soils on dynamic failure modes and dynamic responses of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 759-766. (in Chinese with English abstract)

[146] 左雅娅, 冯文凯. 土质边坡震裂机制物理模拟研究 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(1): 21-28.
ZUO Y Y, FENG W K. Physical simulation on genetic mechnism of rupture in soil slope under earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(1): 21-28. (in Chinese with English abstract)

[147] 王闯, 董金玉, 刘汉东, 等. 三段式锁固型岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究 [J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4428-4441.
WANG C, DONG J Y, LIU H D, et al. Shaking table model test on dynamic response characteristics and failure mechanism of three sections locked rock slope[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4428-4441. (in Chinese with English abstract)

[148] HE J X, ZHAN Z F, QI S W, et al. Investigation into a homogenous step-like rock slope response under wide-frequency seismic loads using a large-scale shaking table[J]. Natural Hazards, 2023, 116(2): 2645-2669.

[149] 江学良, 牛家永, 杨慧, 等. 下伏隧道层状岩质边坡地震响应特性的大型振动台试验研究 [J]. 应用力学学报, 2018, 35(4): 762-768.
JIANG X L, NIU J Y, YANG H, et al. Large-scale shaking table model test study of seismic response characteristics on layered rock slope with tunnel[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(4): 762-768. (in Chinese with English abstract)

[150] 信春雷, 李文惠, 冯文凯, 等. 近断层地震动对阶梯式顺层岩质路堑边坡震裂损伤的作用机制 [J]. 振动工程学报, 2025, 38(2): 352-364.
XIN C L, LI W H, FENG W K, et al. Action mechanism of near-fault earthquake on shatter damage of stepped bedding rock cutting slope[J]. Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(2): 352-364. (in Chinese with English abstract)

[151] 赵飞, 俞松波, 李博, 等. 地震作用下岩质边坡大型振动台试验研究进展 [J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4498-4512.
ZHAO F, YU S B, LI B, et al. Research advances on large-scale shaking table test for rock slopes under earthquake[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4498-4512. (in Chinese with English abstract)

[152] 刘婧雯, 黄博, 邓辉, 等. 地震作用下堆积体边坡振动台模型试验及抛出现象分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 307-311.
LIU J W, HUANG B, DENG H, et al. Shaking table tests and throwing phenomenon of deposit slopes under earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 307-311. (in Chinese with English abstract)

[153] 关振长, 廖重辉, 龚振峰, 等. 基于振动台模型试验的二元结构边坡地震动力响应研究 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 139-146.
GUAN Z C, LIAO C H, GONG Z F, et al. Seismic response of dual structure slope based on shaking table model test[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 139-146. (in Chinese with English abstract)

[154] 谢显龙, 廖昕, 施艳秋, 等. 黄土基覆层边坡动力破坏特征的大型振动台试验研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1371-1379.
XIE X L, LIAO X, SHI Y Q, et al. Experimental study on dynamic failure characteristics of loess slope with bedrock and overburden layer by large scale shaking table test[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(4): 1371-1379. (in Chinese with English abstract)

[155] CHEN J C, WANG L M, WANG P, et al. Failure mechanism investigation on loess-mudstone landslides based on the Hilbert-Huang transform method using a large-scale shaking table test[J]. Engineering Geology, 2022, 302: 106630.

[156] 刘汉香, 许强, 徐鸿彪, 等. 斜坡动力变形破坏特征的振动台模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 334-339.
LIU H X, XU Q, XU H B, et al. Shaking table model test on slope dynamic deformation and failure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 334-339. (in Chinese with English abstract)

[157] 刘汉东, 赵亚文, 董金玉, 等. 含软弱岩层反倾岩质边坡地震动力响应与破坏模式 [J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4373-4389.
LIU H D, ZHAO Y W, DONG J Y, et al. Seismic dynamic response and failure mode of anti-dip rock slope with weak rock stratum[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4373-4389. (in Chinese with English abstract)

[158] 范亚伦, 张伟宾, 周志军, 等. 含不连续面岩质边坡动力响应研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(6): 1184-1191.

FAN Y L, ZHANG W B, ZHOU Z J, et al. Research on dynamic response of rock slopes with discontinuous joints[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(6): 1184-1191. (in Chinese with English abstract)

[159] SAHOO S, MANNA B, SHARMA K G. Shaking table tests to evaluate the seismic performance of soil nailing stabilized embankments[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(4): 04021036.

[160] 李丽华, 任增乐, 李广信, 等. 复合加筋路堤边坡振动台模型试验 [J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 496-504.
LI L H, REN Z L, LI G X, et al. Shaking table model tests for composite reinforced slopes[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(3): 496-504. (in Chinese with English abstract)

[161] UGAI K, YANG Q, CAI F, et al. Laboratory flume static and dynamic experiment for rock avalanches[C]//Anon. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. [S. l]: [S. n], 2010: 278-287.

[162] CHEN Z X, YANG P, LIU H L, et al. Characteristics analysis of granular landslide using shaking table model test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105761.

[163] 韩俊艳, 杜修力, 李立云. 土工振动台试验连续体模型箱的适用性研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(2): 200-208.
HAN J Y, DU X L, LI L Y. Study on applicability of continuum model box used in shaking table test[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(2): 200-208. (in Chinese with English abstract)

[164] WANG G B, BA F, MIAO Y, et al. Design of multi-array shaking table tests under uniform and non-uniform earthquake excitations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 153: 107114.

[165] 国巍, 李绿宇, 邵平. 大型结构地震模拟振动台及台阵的试验精度分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(2): 16-21.
GUO W, LI L Y, SHAO P. Precision analysis of large structure seismic experiment utilizing shaking table for earthquake simulation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(2): 16-21. (in Chinese with English abstract)

[166] 郭明珠, 谷坤生, 王天成. 反倾岩质斜坡振动台试验研究综述 [J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(6): 157-167.
GUO M Z, GU K S, WANG T C. Summary of shaking table test research on anti-dipping rock slope[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021, 43(6): 157-167. (in Chinese with English abstract)

[167] LONG Z, YAN Z X, LIU C B. Shear effects on the anchorage interfaces and seismic responses of a rock slope containing a weak layer under seismic action[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1): 1424167.

[168] CLOOS H. Zur experimentellen tektonik[J]. Naturwissenschaften, 1930, 18(34): 741-747.

[169] BRAY J W, GOODMAN R E. The theory of base friction models[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(6): 453-468.

[170] 蔡国军, 黄润秋, 严明, 等. 反倾向边坡开挖变形破裂响应的物理模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 811-817.
CAI G J, HUANG R Q, YAN M, et al. Physical simulation study on deformation and failure response of an anti-inclined slope during excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 811-817. (in Chinese with English abstract)

[171] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 缓倾角层状高边坡变形破坏机制物理模拟研究 [J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 32-36.
FENG W K, SHI Y C, CHAI H J, et al. Study of mechanism of deformation failure of a low-angle bedded high slope with physical simulation method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 32-36. (in Chinese with English abstract)

[172] 苗朝, 沈军辉, 杨佳丽, 等. 雅砻江甲西滑坡倾倒弯曲-拉裂形成机制研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(3): 411-417.
MIAO Z, SHEN J H, YANG J L, et al. Research on bending and sliding deformation failure mechanism of Jiaxi landslide of Yalong River[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(3): 411-417. (in Chinese with English abstract)

[173] WONG R H C, CHIU M. A study on failure mechanism of block-flexural toppling by physical modelling testing[C]//Anon. The 38th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). [S. 1.]: [S. n.], 2001: ARMA-01-0989.

[174] 易志坚, 黄润秋, 吴海燕, 等. 唐古栋滑坡成因机制研究 [J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1072-1079.
YI Z J, HUANG R Q, WU H Y, et al. Research on formation mechanism of Tanggudong landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6): 1072-1079. (in Chinese with English abstract)

[175] 孙书伟, 李圆, 杨晓锐, 等. 不同岩层倾角顺倾层状岩质边坡破坏机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1607-1620.
SUN S W, LI Y, YANG X R, et al. Study on the failure mechanism of rock slopes with dipped layered structures under various rock dip conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1607-1620. (in Chinese with English abstract)

[176] 李任杰, 胡富杭, 石豫川, 等. 基于底摩擦试验的硬岩岩质边坡变形过程及破坏机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 145-152.
LI R J, HU F H, SHI Y C, et al. A study of deformation process and failure mechanism of hard rock slope based on the bottom friction test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 145-152. (in Chinese with English abstract)

[177] 张御阳, 裴向军, 唐皓, 等. 反倾岩坡倾倒变形结构面影响效应研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 844-851.
ZHANG Y Y, PEI X J, TANG H, et al. Experimental tests for impact of structural surfaces to toppling deformation in anti-dipped rock slopes[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 844-851. (in Chinese with English abstract)

[178] 陈亚军, 王家臣, 常来山, 等. 节理岩体边坡渐进破坏的试验研究 [J]. 金属矿山, 2005(8): 11-13.
CHEN Y J, WANG J C, CHANG L S, et al. Experimental research on progressive failure of jointed rock slope[J]. Metal Mine, 2005(8): 11-13. (in Chinese with English abstract)

[179] 张登项, 许强. 基于底摩擦试验的锦屏一级水电站左岸岩石高

边坡变形机制研究 [J]. 地质灾害与环境保护，2008，19（1）：71-75.
ZHANG D X, XU Q. Research on deformation mechanism of the high rock-slope at left of Jinping First Stage Hydropower Station by experiment of basal contacting friction[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2008, 19（1）：71-75.（in Chinese with English abstract）
[180] 许强，张登项，郑光. 锦屏Ⅰ级水电站左岸坝肩边坡施工期破坏模式及稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(6)：1183-1192.
XU Q, ZHANG D X, ZHENG G. Failure mode and stability analysis of left bank abutment high slope at Jinping Ⅰ Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28（6）：1183-1192.（in Chinese with English abstract）
[181] 习朝辉，裴向军，穆成林，等. 顺层岩质边坡开挖变形破坏特征研究 [J]. 煤炭技术，2019，38(2)：122-125.
XI Z H, PEI X J, MU C L, et al. Study on deformation and failure character of rock slope with multilayer soft interlayers[J]. Coal Technology, 2019, 38（2）：122-125.（in Chinese with English abstract）
[182] PHILIP B. Use of models for the study of mining problems[C]//Anon. American Institution of Mining and Metallurgical Engineers. [S. l.]: [S. n.], 1931: 3-28.
[183] CAREY T J, HASHIMOTO T, CIMINI D, et al. LEAP-GWU-2015 centrifuge test at UC Davis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 113: 663-670.
[184] 温继伟，陈昊天，曾现恩，等. 土工离心机设计与应用综述 [J]. 岩土工程技术，2023，37(4)：379-385.
WEN J W, CHEN H T, ZENG X E, et al. Review of design and application of geotechnical centrifuge[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37（4）：379-385.（in Chinese with English abstract）
[185] 魏迎奇，张雪东，张紫涛，等. 基于 LXJ-4-450 平台的土工离心模型试验研究 [J]. 水利学报，2018，49(9)：1087-1096.
WEI Y Q, ZHANG X D, ZHANG Z T, et al. Geotechnical centrifuge modelling based on LXJ-4-450 platform[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49（9）：1087-1096.（in Chinese with English abstract）
[186] 章为民，日下部治. 砂性地层地震反应离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报，2001，23(1)：28-31.
ZHANG W M, KUSAKABE O. Dynamic centrifuge model test of sandy layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23（1）：28-31.（in Chinese with English abstract）
[187] NG C W W. The state-of-the-art centrifuge modelling of geotechnical problems at HKUST[J]. Journal of Zhejiang University（Science A）, 2014, 15（1）：1-21.
[188] 张欣欣，范宣梅，王文松，等. 高寒地区楔形体滑坡启动机制离心模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(5)：1202-1213.
ZHANG X X, FAN X M, WANG W S, et al. Initiation mechanism of wedge landslide in alpine regions by centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42（5）：1202-1213.（in Chinese with English abstract）
[189] 杜强，周健. 基于离心模型试验的降雨诱发滑坡宏细观机理研究 [J]. 岩土工程学报，2020，42(增刊 1)：50-54.
DU Q, ZHOU J. Centrifugal model tests on slope failure induced by rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42（S1）：50-54.（in Chinese with English abstract）
[190] 李明，张嘎，李焯芬，等. 离心模型试验中边坡开挖设备的研制与应用 [J]. 岩土工程学报，2010，32(10)：1638-1642.
LI M, ZHANG G, LI C F, et al. Development and application of a slope excavation device for centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32（10）：1638-1642.（in Chinese with English abstract）
[191] 陈强，孟国伟，刘世东. 砂性土边坡稳定性离心模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质，2011，38(2)：58-62.
CHEN Q, MENG G W, LIU S D. Centrifuge model tests on the stability of sandy soil slopes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38（2）：58-62.（in Chinese with English abstract）
[192] 汪小刚，张建红，赵毓芝，等. 用离心模型研究岩石边坡的倾倒破坏 [J]. 岩土工程学报，1996，18(5)：14-21.
WANG X G, ZHANG J H, ZHAO Y Z, et al. Investigations on mechanism of slope toppling failure by centrifuge model testing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18（5）：14-21.（in Chinese with English abstract）
[193] 陈晓平，黄井武，吴宏伟，等. 库岸古滑坡离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报，2011，33(10)：1496-1503.
CHEN X P, HUANG J W, WU H W, et al. Centrifugal model tests on ancient bank landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33（10）：1496-1503.（in Chinese with English abstract）
[194] SORIANO CAMELO C Y, DE ALMEIDA M C F, DE SOUZA SOARES DE ALMEIDA M, et al. Centrifuge modeling of the seismic behavior of soft clay slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148（11）：04022089.
[195] BOWMAN E T, LAUE J, IMRE B, et al. Experimental modelling of debris flow behaviour using a geotechnical centrifuge[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47（7）：742-762.
[196] HUNG W Y, TRAN M C, YEH F H, et al. Centrifuge modeling of failure behaviors of sandy slope caused by gravity, rainfall, and base shaking[J]. Engineering Geology, 2020, 271: 105609.
[197] ACOSTA E A, TIBANA S, DE SOUZA SOARES DE ALMEIDA M, et al. Centrifuge modeling of hydroplaning in submarine slopes[J]. Ocean Engineering, 2017, 129: 451-458.
[198] COULTER S E. Seismic initiation of submarine slope failures using physical modelling in a geotechnical centrifuge [D]. St John's: Memorial University of Newfoundland, 2008.
[199] TIMPONG S, ITOH K, TOYOSAWA Y. Geotechnical centrifuge modelling of slope failure induced by ground water table change[C]//Anon. Landslides and Climate Change: Challenges and Solutions-Proceedings of the International Conference on Landslides and Climate Change. [S. l.]: [S. n.], 2007: 107-112.
[200] CAREY T J, CHIARADONNA A, LOVE N C, et al. Effect of soil gradation on embankment response during liquefaction: A centrifuge testing program[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 157: 107221.
[201] 冯振，殷跃平. 我国土工离心模型试验技术发展综述 [J]. 工程

地质学报, 2011, 19(3): 323-331.
FENG Z, YIN Y P. Statw of the art review of geotechnical centrifuge modeling test in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(3): 323-331. (in Chinese with English abstract)
[202] 刘晶波, 赵冬冬, 张小波, 等. 地基自由场离心机振动台模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 980-987.
LIU J B, ZHAO D D, ZHANG X B, et al. Dynamic centrifuge model tests on an unconfined soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 980-987. (in Chinese with English abstract)
[203] LIU H D, CHEN J X, HAN W X, et al. Centrifuge model tests and numerical simulations of the landslide evolution process[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(6): 2588-2599.
[204] ZHANG S, PEI X J, WANG S Y, et al. Centrifuge model testing of a loess landslide induced by rising groundwater in Northwest China[J]. Engineering Geology, 2019, 259: 105170.
[205] 裴向军, 张硕, 黄润秋, 等. 地下水壅高诱发黄土滑坡离心模型试验研究 [J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 55-63.
PEI X J, ZHANG S, HUANG R Q, et al. Study on centrifuge model test of loess landslide induced by enrichment of groundwater[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(5): 55-63. (in Chinese with English abstract)
[206] JAYAKODY S H S, UZUOKA R, UEDA K. Effect of groundwater dynamics in rain-induced landslides: Centrifuge and numerical study[J]. Soils and Foundations, 2024, 64(4): 101482.
[207] DONG S, FENG W K, FENG W K, et al. Examination of rainfall-induced landslide failure mechanisms *via* a centrifuge physical simulation test[J]. Open Journal of Geology, 2019, 9(13): 1004-1021.
[208] 朱谭方, 辛鹏, 姚磊华, 等. 水力作用诱发硬土软岩滑坡启动机制研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2733-2740.
ZHU T F, XIN P, YAO L H, et al. Initiation mechanism of soft rock landslide induced by hydraulic action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2733-2740. (in Chinese with English abstract)
[209] CUI S H, PEI X J, WU H Y, et al. Centrifuge model test of an irrigation-induced loess landslide in the Heifangtai loess platform, Northwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(1): 130-143.
[210] 苗发盛, 吴益平, 谢媛华, 等. 水位升降条件下牵引式滑坡离心模型试验 [J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 605-613.
MIAO F S, WU Y P, XIE Y H, et al. Centrifugal test on retrogressive landslide influenced by rising and falling reservoir water level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 605-613. (in Chinese with English abstract)
[211] 汤明高, 李松林, 许强, 等. 基于离心模型试验的库岸滑坡变形特征研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 755-764.
TANG M G, LI S L, XU Q, et al. Study of deformation characteristics of reservoir landslide based on centrifugal model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 755-764. (in Chinese with English abstract)
[212] LI S L, XU Q, TANG M G, et al. Centrifuge modeling and the analysis of ancient landslides subjected to reservoir water level fluctuation[J]. Sustainability, 2020, 12(5): 2092.
[213] LUO F Y, ZHANG G. Progressive failure behavior of cohesive soil slopes under water drawdown conditions[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(11): 973.
[214] ZHANG Q, JIA C J, CHEN H J, et al. Centrifuge modeling test on reactivation of ancient landslide under sudden drop of reservoir water and rainfall[J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(8): 5651-5672.
[215] MIAO F S, WU Y P, LI L W, et al. Centrifuge model test on the retrogressive landslide subjected to reservoir water level fluctuation[J]. Engineering Geology, 2018, 245: 169-179.
[216] FAN L, ZHANG G C, LI B, et al. Deformation and failure of the Xiaochatou landslide under rapid drawdown of the reservoir water level based on centrifuge tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(3): 891-900.
[217] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究 [J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 80-86.
XU G M, ZHANG W M. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 80-86. (in Chinese with English abstract)
[218] 徐光明, 王年香, 顾行文, 等. 模型箱约束对大变形破坏离心模型试验影响初探 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 232-242.
XU G M, WANG N X, GU X W, et al. Preliminary study on influences of model container constraint on large-deformation failure behaviors by centrifuge modeling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 232-242. (in Chinese with English abstract)
[219] CAICEDO B, TRISTANCHO J, THOREL L. Mathematical and physical modelling of rainfall in centrifuge[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2015, 15(3): 150-164.
[220] BRYANT S K, TAKE W A, BOWMAN E T, et al. Physical and numerical modelling of dry granular flows under Coriolis conditions[J]. Géotechnique, 2015, 65(3): 188-200.
[221] 张陈羊, 巨能攀, 李龙起, 等. 离心场中陡倾顺层岩质边坡振动试验关键技术研究 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(9): 104-109.
ZHANG C Y, JU N P, LI L Q, et al. Key technologies of the vibration test of steep bedding rock slope in centrifugal field[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(9): 104-109. (in Chinese with English abstract)
[222] 白冰, 周健. 土工离心模型试验技术的一些进展 [J]. 西部探矿工程, 2000, 65(4): 8-11.
BAI B, ZHOU J. Some advances on geotechnical centrifuge model test technology[J]. West-China Exploration Engineering, 2000, 65(4): 8-11. (in Chinese with English abstract)
[223] ZHANG Z L, WANG T, WU S R, et al. Investigation of dormant landslides in earthquake conditions using a physical model[J]. Landslides, 2017, 14(3): 1181-1193.
[224] AFFENDI A A, FAISAL A. Field measurement of soil suction[C]//Anon. 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New Jersey, USA: Balkema Publishers, 1994: 1013-1016.
[225] JOHNSON K A, SITAR N. Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(6): 789-801.
[226] LIM T T, RAHARDJO H, CHANG M F, et al. Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope[J]. Canadian Geotech-

nical Journal, 1996, 33(4): 618-628.

[227] ZHAN T L, NG C W, FREDLUND D G. Field study of rainfall infiltration into a grassed unsaturated expansive soil slope[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(4): 392-408.

[228] ZHANG J, JIAO J J, YANG J. In situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China[J]. Engineering Geology, 2000, 57(1/2): 31-38.

[229] NG C W W, ZHAN L T, BAO C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration[J]. Géotechnique, 2003, 53(2): 143-157.

[230] FENG W K, HUANG R Q, LIU J T, et al. Large-scale field trial to explore landslide and pipeline interaction[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(6): 1466-1473.

[231] 秦鹏飞, 齐悦, 杨光, 等. 岩土工程测试技术研究新进展 [J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(5): 8-13.
QIN P F, QI Y, YANG G, et al. Geotechnical testing technology and its research progress[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(5): 8-13. (in Chinese with English abstract)

[232] 陈云敏, 韩超, 凌道盛, 等. ZJU400 离心机研制及其振动台性能评价 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1887-1894.
CHEN Y M, HAN C, LING D S, et al. Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1887-1894. (in Chinese with English abstract)

[233] PILGRIM D H, HUFF D D. Suspended sediment in rapid subsurface stormflow on a large field plot[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1983, 8(5): 451-463.

[234] HARP E L, WELLS W G, SARMIENTO J G. Pore pressure response during failure in soils[J]. GSA Bulletin 1990, 102(4): 428-438.

[235] 姚昌荣, 王友彪, 李亚东, 等. 泥石流冲击桥梁 2019 年度研究进展 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 28-36.
YAO C R, WANG Y B, LI Y D, et al. State-of-the-art review of debris flow impact forces on bridges in 2019[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 28-36. (in Chinese with English abstract)

[236] 杨仁文, 叶明富, 陈精日. 云南蒋家沟泥石流运动要素观测数据整编 [J]. 山地研究, 1998, 16(4): 338-341.
YANG R W, YE M F, CHEN J R. Research on database of the debris flow motion characteristics in Jiangjia gully[J]. Journal of Mountain Research, 1998, 16(4): 338-341. (in Chinese with English abstract)

[237] 胡明鉴, 汪稔, 张平仓. 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究: 以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡地为例 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 454-457.
HU M J, WANG R, ZHANG P C. Primary research on the effect of rainfall on landslide: Taking the slope piled by old landslide in Jiangjiagou valley as example[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 454-457. (in Chinese with English abstract)

[238] OCHIAI H, OKADA Y, FURUYA G, et al. A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall[J]. Landslides, 2004, 1(3): 211-219.

[239] 傅鹤林, 李昌友, 郭峰, 等. 滑坡触发因素及其影响的原位试验 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(3): 781-785.
FU H L, LI C Y, GUO F, et al. Situ-test of abduction elements of landslide and its influence[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(3): 781-785. (in Chinese with English abstract)

[240] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测 [J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 151-158.
ZHAN L T, WU H W, BAO C G, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 151-158. (in Chinese with English abstract)

[241] 汪丽, 李新生, 李同录. 隐伏地裂缝扩展的大型原位浸水试验研究 [J]. 地质力学学报, 2019, 25(3): 412-420.
WANG L, LI X S, LI T L. Large-scale in situ submerging experiment on buried ground-fissures expansion[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(3): 412-420. (in Chinese with English abstract)

[242] 陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 106-116.
CHEN X Q, CUI P, FENG Z L, et al. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 106-116. (in Chinese with English abstract)

[243] BUGNION L, WENDELER C. Shallow landslide full-scale experiments in combination with testing of a flexible barrier[C]// Anon. WIT Transactions on Engineering Sciences. Milan, Italy: WIT Press, 2010: 161-173.

[244] CHEN S C, FENG Z-Y, WANG C A, et al. A large-scale test on overtopping failure of two artificial dams in Taiwan[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015: 1177-1181.

[245] ZHANG J Y, FAN G, LI H B, et al. Large-scale field model tests of landslide dam breaching[J]. Engineering Geology, 2021, 293: 106322.

[246] 苏鹏程, 刘威, 李昊, 等. 喜马拉雅中段冰湖终碛坝体溃决过程实验研究: 以嘉龙错冰湖终碛坝为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 18-28.
SU P C, LIU W, LI H, et al. Experimental study on the process of end-moraine dam failure in the middle Himalaya glacial lake: Taking the Jialongcuo glacial lake end-moraine dam as an example[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 18-28. (in Chinese with English abstract)

[247] ZHOU G G D, CUI P, CHEN H Y, et al. Experimental study on cascading landslide dam failures by upstream flows[J]. Landslides, 2013, 10(5): 633-643.

[248] 朱兴华, 崔鹏, 陈华勇, 等. 串珠状堰塞湖级联溃决对汶川震区河流演化的影响 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(4): 64-69.
ZHU X H, CUI P, CHEN H Y, et al. Effects of cascade failure of dammed lakes on the evolution of rivers in Wenchuan earthquake region[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(4): 64-69. (in Chinese with English abstract)

[249] 李长冬, 龙晶晶, 姜茜慧, 等. 水库滑坡成因机制研究进展与展望 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(1): 67-77.
LI C D, LONG J J, JIANG X H, et al. Advance and prospect of formation mechanism for reservoir landslides[J]. Bulletin of Geo-

logical Science and Technology, 2020, 39(1): 67-77. (in Chinese with English abstract)

[250] CHEN J C, WANG L M, PU X W, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of low-angle loess slope under the influence of long- and short-term effects of rainfall before earthquake[J]. Engineering Geology, 2020, 273: 105684.

[251] QIU H Z, KONG J M, WANG R C, et al. Response mechanism of post-earthquake slopes under heavy rainfall[J]. Journal of Seismology, 2017, 21(4): 869-884.

[252] NAKAZAWA H, ISHIZAWA T, DANJO T, et al. Model tests on the stability of retaining walls with gabions under earthquake and rainfall conditions[M]. Cham: Springer International Publishing, 2021: 56-67.

[253] ZHOU X H, CHENG X S, QI L, et al. Shaking table model test of loess tunnel structure under rainfall[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(6): 2225-2238.

[254] XU J W, UEDA K, UZUOKA R. Evaluation of failure of slopes with shaking-induced cracks in response to rainfall[J]. Landslides, 2022, 19(1): 119-136.

[255] 苏立君,梁双庆,王洋. 震后降雨型碎石土斜坡稳定性的试验研究 [J]. 工程科学与技术,2019,51(4):12-20.
SU L J, LIANG S Q, WANG Y. Experimental study on the stability of rainfall-induced gravel landslide post earthquake[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(4): 12-20. (in Chinese with English abstract)

[256] CHEN J C, WANG L M, CHE A L. Failure mechanism analysis of loess slope under the coupling effect of rainfall and earthquake using shaking table test[C]//Anon. Proceedings of the 4th International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (Beijing 2022). Cham: Springer International Publishing, 2022: 1289-1296.

[257] NGUYEN T N, KAWAMURA S, DAO M H, et al. Influence of fines content on the stability of volcanic embankments under rainfall and earthquake[J]. Water, 2022, 14(13): 2096.

[258] YIN X J, WANG L M. Shaking table tests on sliding displacements of loess slope under coupling effect of rainfall and earthquake[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 5736305.

[259] PU X W, WANG L M, WANG P, et al. Study of shaking table test of seismic subsidence loess landslides induced by the coupling effect of earthquakes and rainfall[J]. Natural Hazards, 2020, 103(1): 923-945.

[260] 荆海晓,李磊,李鹏峰,等. 不同类型滑坡涌浪波爬坡的实验研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2023,38(1):107-113.
JING H X, LI L, LI P F, et al. Experimental investigation on run-up of different types of landslide waves[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(1): 107-113. (in Chinese with English abstract)

[261] JING J J, WU Z J, YAN W J, et al. Experimental study on progressive deformation and failure mode of loess fill slopes under freeze-thaw cycles and earthquakes[J]. Engineering Geology, 2022, 310: 106896.

[262] ZHANG C, CAI Z Y, HUANG Y H, et al. Laboratory and centrifuge model tests on influence of swelling rock with drying-wetting cycles on stability of canal slope[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018(1): 4785960.

[263] ZHOU Y G, MENG D, MA Q, et al. Frequency response function and shaking control of the ZJU-400 geotechnical centrifuge shaker[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2020, 20(2): 97-117.

[264] WANG Y Z, YUAN X M, SUN R. General layout and key construction technologies of large scale centrifugal shakers[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90/91/92/93: 1627-1633.

[265] 巨能攀,邓天鑫,李龙起,等. 强震作用下陡倾顺层斜坡倾倒变形机制离心振动台试验 [J]. 岩土力学,2019,40(1):99-108.
JU N P, DENG T X, LI L Q, et al. Centrifugal shaking table test on toppling deformation mechanism of steep bedding slope under strong earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 99-108. (in Chinese with English abstract)

[266] 张泽林,吴树仁,王涛,等. 地震作用下黄土滑坡加速度深度放大效应及震后变形模式研究 [J]. 土木工程学报,2018,51(4):102-110.
ZHANG Z L, WU S R, WANG T, et al. Study on acceleration depth amplification effect and deformation model of loess landslide under earthquakes[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(4): 102-110. (in Chinese with English abstract)

[267] 陈生水,顾行文,任国峰,等. NHRI-400 g·t 大型土工离心机升级改造 [J]. 岩土工程学报,2020,42(增刊 2):7-12.
CHEN S S, GU X W, REN G F, et al. Upgradation of NHRI-400 g·t geotechnical centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 7-12. (in Chinese with English abstract)

[268] CHEN Y L, IRFAN M, UCHIMURA T, et al. Elastic wave velocity monitoring as an emerging technique for rainfall-induced landslide prediction[J]. Landslides, 2018, 15(6): 1155-1172.

[269] NAKAZAWA H, USUKURA K, HARA T, et al. Problems in earthquake resistance evaluation of gabion retaining wall based on shake table test with full-scale model[J]. Journal of Disaster Research, 2019, 14(9): 1154-1169.

[270] 巴振宁,符瞻远,韩庆华,等. 大型复杂动力机器基础参振质量的概念、理论及应用 [J]. 地震工程与工程振动,2023,43(3):56-68.
BA Z N, FU Z Y, HAN Q H, et al. Concept, theoretical and application of participating mass of large-scale complex dynamic machine foundation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(3): 56-68. (in Chinese with English abstract)

[271] 周公旦,崔鹏,吴宏伟,等. 山地灾害大尺度动力学模拟实验平台 [J]. 中国科学院院刊,2024,39(8):1458-1467.
ZHOU G D, CUI P, WU H W, et al. Large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards(LEADS) [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(8): 1458-1467. (in Chinese with English abstract)

[272] 袁宗盼,陈新民,袁媛,等. 地质力学模型相似材料配比的正交试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报,2014,34(2):197-202.
YUAN Z P, CHEN X M, YUAN Y, et al. Study on ratio of similar material of geomechanical model based on orthogonal test[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(2): 197-202. (in Chinese with English abstract)

[273] 王汉鹏,李术才,张强勇,等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(9):1842-1847.
WANG H P, LI S C, ZHANG Q Y, et al. Development of a new

geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1842-1847. (in Chinese with English abstract)

[274] AMINI M, GOLAMZADEH M, KHOSRAVI M. Physical and theoretical modeling of rock slopes against block-flexure toppling failure[J]. International Journal of Mining and Geo-Engineering, 2015, 49(2): 155-171.

[275] DENG Z Y, LIU X R, LIU Y Q, et al. Model test and numerical simulation on the dynamic stability of the bedding rock slope under frequent microseisms[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 19(4): 919-935.

[276] 柴少峰, 王平, 郭海涛, 等. 大型振动台试验土质边坡模型材料相似性及评价 [J]. 地震工程学报, 2019, 41(5): 1308-1315.
CHAI S F, WANG P, GUO H T, et al. Model material similarity and associated evaluation for soil slopes in a large-scale shaking table test[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1308-1315. (in Chinese with English abstract)

[277] 王琳, 谭建民, 李高, 等. 滑坡物理模型试验研究进展 [J]. 科技通报, 2020, 36(8): 1-8.
WANG L, TAN J M, LI G, et al. A review on landslide physical model test[J]. Bulletin of Science and Technology, 2020, 36(8): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[278] 姬彦东, 林棋文, 王玉峰, 等. 滑坡-碎屑流模型实验岩石相似材料特性研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(3): 924-931.
JI Y D, LIN Q W, WANG Y F, et al. Study on rock similar material characteristics of rock avalanche[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(3): 924-931. (in Chinese with English abstract)

[279] 许超, 薛雷, 崔远, 等. 岩质滑坡模型相似材料试验研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40(11): 1-9.
XU C, XUE L, CUI Y, et al. Experimental study on similar materials of rock landslide model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(11): 1-9. (in Chinese with English abstract)

[280] ZHOU T, ZHU J B. Identification of a suitable 3D printing material for mimicking brittle and hard rocks and its brittleness enhancements[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(3): 765-777.

[281] 王乐华, 胡永搏, 付寅韬, 等. 3D 打印技术在岩石力学试验中的应用与展望 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(11): 137-154.
WANG L H, HU Y B, FU Y T, et al. Application and prospect of 3D printing technology in rock mechanics test[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(11): 137-154. (in Chinese with English abstract)

[282] JIANG C, ZHAO G F. A preliminary study of 3D printing on rock mechanics[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(3): 1041-1050.

[283] 王樯樯, 陈盟, 唐莹影, 等. 透明土试验技术在滑坡降雨入渗中的研究与应用 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3051-3062.
WANG X T, CHEN M, TANG Y Y, et al. Research and application of transparent soil test technology in rainfall infiltration of landslide[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3051-3062. (in Chinese with English abstract)

[284] 杜建明, 房倩, 刘翔, 等. 透明土物理模拟试验技术现状与趋势 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 852-861.
DU J M, FANG Q, LIU X, et al. The present and development trend of physical simulation experiment technology for transparent soils[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(3): 852-861. (in Chinese with English abstract)

[285] ZHOU C, MA W C, SUI W H. Transparent soil model test of a landslide with umbrella-shaped anchors and different slope angles in response to rapid drawdown[J]. Engineering Geology, 2022, 307: 106765.

[286] SUI W H, ZHENG G S. An experimental investigation on slope stability under drawdown conditions using transparent soils[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(3): 977-985.

[287] WEI L T, XU Q, WANG S Y, et al. The morphology evolution of the shear band in slope: Insights from physical modelling using transparent soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4): 1849-1860.

[288] 胡南燕, 黄建彬, 罗斌玉, 等. 环氧树脂基脆性透明岩石相似材料配比试验研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3471-3480.
HU N Y, HUANG J B, LUO B Y, et al. Experimental study on proportioning of epoxy resin-based transparent brittle rock-like materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3471-3480. (in Chinese with English abstract)

[289] 周昌, 马文超, 胡元骏, 等. 基于透明土的库水位骤降下消落带滑坡-伞型锚体系变形破坏机理 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1407-1417.
ZHOU C, MA W C, HU Y J, et al. Failure mechanism of water-level fluctuation zone with umbrella-shaped anchors under rapid drawdown based on transparent soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4): 1407-1417. (in Chinese with English abstract)

[290] 冷先伦, 王川, 盛谦, 等. 基于透明相似模型试验的主控裂隙边坡变形破坏演化机制研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1283-1294.
LENG X L, WANG C, SHENG Q, et al. Evolution mechanism of deformation and failure of rock slope with controlling fissure through transparent physical model experiments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(5): 1283-1294. (in Chinese with English abstract)

[291] BATHURST R J, EZZEIN F M. Geogrid and soil displacement observations during pullout using a transparent granular soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(5): 20140145.

[292] YANG X L, DONG J Y, YANG J H, et al. Similar material proportioning tests and mechanical properties based on orthogonal design[J]. Materials, 2023, 16(19): 6439.

[293] CUI Y, XU C, XUE L, et al. Experimental study on the reasonable proportions of rock-like materials for water-induced strength degradation in rock slope model test[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 9288.

[294] 朱权威, 冯文凯, 肖锐铧, 等. 三峡库区岩质滑坡离心模拟黏结材料渗透性试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 8904-8908.
ZHU Q W, FENG W K, XIAO R H, et al. Experimental study on permeability of centrifugally simulated bond materials for rock landslides in the Three Gorges Reservoir area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(22): 8904-8908. (in Chinese with English abstract)

[295] 赵建军，李金锁，马运韬，等. 降雨诱发采动滑坡物理模拟试验研究[J]. 煤炭学报，2020，45（2）：760-769.
ZHAO J J, LI J S, MA Y T, et al. Experimental study on failure process of mining landslide induced by rainfall[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45（2）：760-769.（in Chinese with English abstract）

[296] 宁奕冰，唐辉明，张勃成，等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩土力学，2020，41（6）：2009-2020.
NING Y B, TANG H M, ZHANG B C, et al. Investigation of the rock similar material proportion based on orthogonal design and its application in base friction physical model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41（6）：2009-2020.（in Chinese with English abstract）

[297] 祝介旺，吕国靖，李文乐，等. 强震作用下崩滑危岩体模型试验滑面材料配比研究[J]. 山东建筑大学学报，2024，39（3）：18-25.
ZHU J W, LYU G J, LI W L, et al. Study on material ratio of sliding surface for model testing of landslide under strong earthquake effect[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2024, 39（3）：18-25.（in Chinese with English abstract）

[298] 陈矿雨，赵其华. 小相似比高位滑坡模型试验相似材料研究[J]. 人民长江，2024，55（9）：187-193.
CHEN K Y, ZHAO Q H. Research on similar materials of high-elevation landslide model test with small similarity ratio[J]. Yangtze River, 2024, 55（9）：187-193.（in Chinese with English abstract）

[299] ZHU C G, YANG F, ZHENG J L, et al. Interaction and treatment for tunnels orthogonally traversing large bedrock landslides[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25（7）：2758-2769.

[300] 肖捷夫，李云安，胡勇，等. 库水涨落和降雨条件下古滑坡变形特征模型试验研究[J]. 岩土力学，2021，42（2）：471-480.
XIAO J F, LI Y A, HU Y, et al. Model tests on deformation characteristics of ancient bank landslide under water level fluctuation and rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42（2）：471-480.（in Chinese with English abstract）

[301] 曹玲，罗先启，程圣国. 千将坪滑坡物理模型试验相似材料研究[J]. 三峡大学学报（自然科学版），2007，29（1）：37-39.
CAO L, LUO X Q, CHENG S G. Research on similar material of physical model for Qianjiangping landslide[J]. Journal of China Three Gorges University（Natural Sciences）, 2007, 29（1）：37-39.（in Chinese with English abstract）

[302] 任占强，宋章，林棋文，等. 滑坡碎屑化运动物理模型相似材料特性研究[J]. 水文地质工程地质，2021，48（2）：132-142.
REN Z Q, SONG Z, LIN Q W, et al. A study of the similar material characteristics of fragmenting rock mass physical model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48（2）：132-142.（in Chinese with English abstract）

[303] 朱甲龙，王林华，孔昊泉，等. 一种新型模拟软质岩相似材料研究[J]. 武汉理工大学学报，2024，46（6）：28-34.
ZHU J L, WANG L H, KONG H Q, et al. Study on similar material of soft rock bolt pull-out simulation test[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024, 46（6）：28-34.（in Chinese with English abstract）

[304] 任旭，王鸿榕，刘梓晗，等. 可再分散乳胶粉对软岩相似材料性能的影响[J]. 地下空间与工程学报，2023，19（增刊2）：649-655.
REN X, WANG H R, LIU Z H, et al. The influence of redispersible latex powder on similar-materials properties of soft rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19（S2）：649-655.（in Chinese with English abstract）

[305] REN X, ZHANG Z F, XIANG M, et al. An experimental study on the preparation of soft rock similar materials using redispersible latex powder as a modifier[J]. Molecules, 2022, 27（21）：7404.

[306] 张彦君，年廷凯，王亮，等. 岩质边坡物理模型试验相似材料研究[J]. 西南交通大学学报，2019，54（1）：55-60.
ZHANG Y J, NIAN T K, WANG L, et al. Research on similar materials for physical model tests of rock slopes[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54（1）：55-60.（in Chinese with English abstract）

[307] 徐楚，胡新丽，何春灿，等. 水库型滑坡模型试验相似材料的研制及应用[J]. 岩土力学，2018，39（11）：4287-4293.
XU C, HU X L, HE C C, et al. Development and application of similar material for reservoir landslide model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39（11）：4287-4293.（in Chinese with English abstract）

[308] 程圣国，方坤河，朱乔生. 滑坡相似材料试验结果优化理论研究[J]. 三峡大学学报（自然科学版），2002，24（5）：385-387.
CHENG S G, FANG K H, ZHU Q S. Optimization of test result of landslide similar material[J]. Journal of China Three Gorges University（Natural Sciences）, 2002, 24（5）：385-387.（in Chinese with English abstract）

[309] HOJAT A, AROSIO D, IVANOV V I, et al. Geoelectrical characterization and monitoring of slopes on a rainfall-triggered landslide simulator[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 170：103844.

[310] 胡开颜，莫淳淯，张益华，等. 基于自然电位法的滑坡监测实验研究[J]. 地球物理学报，2021，64（12）：4582-4593.
HU K Y, MO C Y, ZHANG Y H, et al. An experimental study on monitoring an indoor landslide based on self-potential method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64（12）：4582-4593.（in Chinese with English abstract）

[311] SCHENATO L, PALMIERI L, CAMPORESE M, et al. Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering[J]. Scientific Reports, 2017, 7：14686.

[312] 陶志刚，李华鑫，曹辉，等. 降雨条件下全段高排土场边坡稳定性实验研究[J]. 煤炭学报，2020，45（11）：3793-3805.
TAO Z G, LI H X, CAO H, et al. Test on the slope stability of full-section high dump under rainfall[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45（11）：3793-3805.（in Chinese with English abstract）

[313] 苏立君，梁双庆，王洋，等. 探地雷达在振动台斜坡模型震裂变形探测中的应用[J]. 工程地质学报，2015，23（增刊1）：728-734.
SU L J, LIANG S Q, WANG Y, et al. Application research of GPR in detection of earthquake-induced deformation of shaking table model slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23（S1）：728-734.（in Chinese with English abstract）

[314] SONG X H, TAN Y. Experimental investigation on the influences of rainfall patterns on instability of sandy slopes[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80（24）：803.

[315] 刘君，刘福海，孔宪京，等. PIV 技术在大型振动台模型试验中的应用 [J]. 岩土工程学报，2010，32(3)：368-374.
LIU J, LIU F H, KONG X J, et al. Application of PIV in large-scale shaking table model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 368-374.（in Chinese with English abstract）
[316] HU W, XU Q, RUI C, et al. An instrumented flume to investigate the initiation mechanism of the post-earthquake huge debris flow in the southwest of China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2): 393-404.

Summary for "地质灾害物理仿真实验发展现状及趋势分析"

Development status and trend analysis of physical simulation experiments for geological hazards

XIAO Zikang[1,2], XU Chong[1,2*], LI Hong[1,2], HUANG Shuai[1,2], LI Bo[1,2], HE Xiangli[1,2]

1. National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China;
2. Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards Dynamics, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

First author, E-mail: zikangxiao@ninhm.ac.cn
* Corresponding author, E-mail: xc11111111@126.com

Abstract: [**Significance**] Over the past 20 years, physical simulation experiments for geological hazards have rapidly developed, evolving into an interdisciplinary field with widespread applications and continuous technological advancements. Analyzing the current status and trends of physical simulation experiments for geological hazards helps researchers gain a comprehensive understanding of the field, design experiments, develop equipment, and update technologies aligned with future directions, thereby promoting innovation in key theories related to geological hazards. [**Progress**] This paper reviews a significant body of domestic and international literature on physical simulation experiments of geological hazards, summarizes five key significances of conducting such experiments, and analyzes the current status of six core physical simulation technologies. Model box and flume are the most widely used simulation technologies due to their versatile combinations, low cost, ease of installation, and simple operation. Base friction simulation technology enables coupling between the model and the gravitational field in two-dimensional settings. Shaking table and centrifuge technologies, while expensive to build and operate, provide controlled vibrational and gravitational conditions, playing an indispensable role in physical simulation experiments. In-situ simulation technology, while facing challenges such as long experimental cycles, difficult model fabrication, high personnel input, low automation, and poor repeatability, offers distinct advantages by mitigating issues such as scaling effects, boundary constraints, and gravitational distortion. [**Conclusions and Prospects**] Physical simulation experiments for geological hazards are evolving toward greater scenario complexity, larger-scale testing, more scientific material selection, and intelligent data collection. These advancements impose higher demands on experimental technologies and economic costs, highlighting the urgent need to foster a conducive development environment. Doing so will enable physical simulation technology to play an even greater role in geohazard research.

Key words: physical simulation experiment; geological hazard; development status; trend analysis

Received: 2024-08-15; Revised: 2024-10-16; Accepted: 2024-10-21

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240454