吴琛,郑珊,柴少峰,等.黄土滑坡振动台试验及滑坡机理研究综述[J].地震工程学报,2027,49(1):163-175.DOI:10.20000/j.1000-0844.20260129001

Wu Chen, Zheng Shan, Chai Shaofeng, et al. A review of loess landslide shaking table tests and landslide mechanisms[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 163-175. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20260129001

黄土滑坡振动台试验及滑坡机理研究综述

吴 琛[1,2], 郑 珊[1,2], 柴少峰[3], 曹国伟[1,2]

(1. 天津大学 国家地震工程科学中心, 天津 300354;
2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350;
3. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 地震滑坡是黄土高原地区工程安全与生态保护的重要威胁之一。振动台试验是揭示黄土边坡地震动力响应与失稳机制的重要手段。在介绍黄土滑坡振动台试验技术的基础上,综述现有研究关于黄土在地震单独作用与地震-降雨耦合作用下的失稳机制、黄土地震液化滑坡机理及滑坡体滑移距离的预测方法方面的成果。结果表明:地震单独作用下,加速度放大效应受地震波参数、地形、土层结构及冻融状态等影响,在坡顶裂隙处最显著;地震-降雨耦合作用下,震前降雨削弱土体形成水致弱化-地震失稳模式,震后降雨通过裂隙渗透增加滑坡概率。黄土地震液化遵循能量积聚-孔压突增结构失效过程,滑坡土体滑移距离与坡高近似一次函数、与体积呈0.2~0.4次幂关系,等效摩擦系数随体积增大呈0.1~0.3次幂衰减。未来研究需深化地震与降雨耦合时序对滑坡影响的对比研究,建立考虑多因素作用的加速度放大效应与滑坡体滑移距离的预测方法,为黄土边坡稳定性评估和灾害预警提供支撑。

关键词: 黄土滑坡;振动台试验;加速度放大效应;地震-降雨耦合作用;滑移距离

中图分类号: P319.5 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2027)01-0163-13

DOI:10.20000/j.1000-0844.20260129001

A review of loess landslide shaking table tests and landslide mechanisms

Wu Chen[1,2], Zheng Shan[1,2], Chai Shaofeng[3], Cao Guowei[1,2]

(*1.National Science Center for Earthquake Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China;*
2.School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
3.Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of CEA & Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Earthquake-induced landslides pose significant threats to engineering safety and ecological protection in the Loess Plateau region. Shaking table tests are effective means of investigating the seismic dynamic response and instability mechanisms of loess slopes. Following an introduction to shaking

收稿日期:2026-01-29

基金项目:国家地震工程科学中心自主课题基金(2025ZZB5009)

第一作者简介:吴 琛(2001-),男,硕士研究生,主要从事地震地质灾害方面的研究。E-mail: 2024205342@tju.edu.cn。

通信作者:郑 珊(1986-),女,博士,教授,主要从事地震地质灾害与河流演变方面的研究。E-mail: zhengs@tju.edu.cn。

table test techniques for loess landslides, this paper reviews existing findings on the instability mechanisms of loess under earthquake-only and coupled earthquake-rainfall conditions, the mechanisms of seismically induced loess liquefaction landslides, and methods for predicting landslide runout distances. The results indicate that under earthquake-only conditions, the acceleration amplification effect is influenced by seismic wave parameters, topography, soil layer structure, and freeze-thaw conditions, and is most pronounced near fractures at the slope crest. Under coupled earthquake-rainfall conditions, pre-earthquake rainfall weakens the soil, resulting in a water-induced weakening and seismic instability mechanism, whereas post-earthquake rainfall increases landslide probability through fissure infiltration. Seismic liquefaction of loess follows a process involving energy accumulation, rapid pore pressure increase, and subsequent structural failure. Landslide runout distance is approximately linearly related to slope height and follows a 0.2—0.4 power law with slide volume; the equivalent friction coefficient decreases with increasing volume following a 0.1—0.3 power law. Future research should strengthen comparative studies on the effects of earthquake-rainfall temporal sequences on landslide occurrence, develop methods for predicting acceleration amplification and landslide runout distance by considering multiple influencing factors, and thereby support loess slope stability assessment and early warning of potential disasters.

Keywords: loess landslide; shaking table test; acceleration amplification effect; earthquake-rainfall coupling; runout distance

0 引言

我国地质灾害频发,其中滑坡与崩塌占比高达80%以上[1]。强震是诱发滑坡灾害的重要因素,1811—2016年全球地震统计资料表明,因地震滑坡导致死亡人数占所有因地震死亡人数的18%[2]。黄土高原是国家“一带一路”倡议的核心区和重要能源基地,同时也是中国典型的生态环境脆弱区与地质灾害高发区,历史上强震频发(如1920年海原M_S8.5地震、2023年积石山M_S6.2地震等)[3],多次诱发大规模滑坡及同震液化泥流灾害,造成了严重人员伤亡和基础设施破坏。例如,1920年海原地震(M8.5)引发的黄土滑坡造成超过50万间房屋及窑洞倒塌,大量建筑受损,最终导致23万余人遇难[4];2023年甘肃积石山地震(M_S6.2)在青海海东中川镇诱发了同震液化滑坡-泥流灾害链,破坏了房屋、电力及交通等基础设施,地震共造成151人遇难、979人受伤[5],其中34人因泥流掩埋致死。

黄土具有大孔隙、垂直节理发育和松散的结构特征,在地震和降雨等自然因素以及人类活动扰动下,其物理力学性质极易劣化,导致边坡失稳风险较高[6]。对黄土地震滑坡开展研究具有重要的科学意义与实践价值。

大型振动台模型试验因能有效控制边界条件、真实模拟地震动荷载并实现破坏过程的可视化,已成为揭示滑坡动力失稳机制的核心手段。近年来,虽然已有学者针对振动台技术发展[7]、岩质边坡动力试验[8]、砂土液化行为[9]开展了系统性的回顾与梳理,但目前仍缺乏针对黄土滑坡振动台试验研究的系统综述。

鉴于此,本文旨在系统梳理黄土滑坡振动台试验研究进展,并归纳黄土滑坡的主要失稳机理。文章首先介绍振动台模型设计准则及试验土体制备,进而综合评述地震单因素作用及地震-降雨耦合作用下的黄土边坡动力响应特性,重点关注地震动在黄土场地中的峰值地面加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)非线性放大效应及降雨-地震时序对黄土边坡稳定性影响,最后综述黄土液化机理与滑移距离预测方法方面的成果,为黄土滑坡机理研究与灾害防控提供科学参考。

1 振动台滑坡试验的相似比尺与土体制备

在振动台上开展原型黄土滑坡灾害的物理模型试验时,由于台面尺寸受限,通常需对研究对象进行缩尺处理,即构建满足几何与材料相似关系的试验模型。黄土滑坡物理模型试验需严格遵循几何相似与材料相似准则,目前多数研究采用“满足主要参数、忽略次要参数”的设计思路。通常选取

三个相互独立的物理量作为基本量以构建相似准则，其他物理量的相似比通过量纲分析（如Buckingham π定理）推导得出。

现有研究主要选取三类不同的基本相似参数开展试验：（1）大部分研究以重力加速度 g、密度 ρ、长度 L 为主要控制参数，开展地震作用下黄土动力响应与失稳特征研究[10]；（2）部分研究采用加速度 a、密度 ρ 及长度 L 为控制参数，突出地震加速度的相似性，相关研究探讨了地震-降雨耦合下泥石流状黄土滑坡的起始机制[11]及边坡动力响应[12]；（3）部分研究以弹性模量 E、密度 ρ、长度 L 为主要控制参数，研究断裂带对地震滑坡的控制作用[13]及软弱结构面对地震波传播的影响等[14]。上述三类研究选取的基本物理量虽存在差异，但根据物理量之间的关系推导得到的比尺关系基本一致，如表1所列。

表1　振动台模型试验中涉及的物理量及相似比关系

Table 1　Physical quantities and similarity relationships involved in shaking table model tests

物理量分类	物理量	比尺关系
几何特性	尺寸 L	C_L
	位移 D	$C_D=C_L$
重力场参数	重力加速度 g	$C_g=1$
材料特性	内摩擦角 φ、土体密度 ρ、应变 ε	$C_\varphi=C_\rho=C_\varepsilon=1$
	黏聚力 c、弹性模量 E、剪切模量 G	$C_c=C_E=C_G=C_L$
	应力 σ	$C_\sigma=C_L$
动力特性	速度 v	$C_v=C_L^{1/2}$
	时长 t	$C_t=C_L^{1/2}$
	频率 f	$C_f=C_L^{-1/2}$
	加速度 a	$C_a=1$

根据原型与模型的相似关系，需制备重塑土或配制土开展试验。重塑土制备分为三步：首先，将取回的土体烘干、碾碎、筛分去除杂质以保证均匀性；然后，加水搅拌，使土体充分浸润至目标含水率；最后，进行分层填筑并压实至目标密度[15]。配制土通过掺入水泥、铁粉、石灰、甘油和粉煤灰等添加剂来模拟原型土体的力学特性[16-18]，该过程通常以密度与含水率为核心控制参数，结合正交设计与直剪试验优化配比，确保配制土的黏聚力、内摩擦角及弹性模量等参数满足要求[19-20]。

重塑土或配制土在振动台模型试验中已被广泛应用。例如，Wang等[21]利用重塑黄土开展了降雨与非降雨条件下黄土高陡边坡的振动台试验；孙文等[22]采用配制土研究了地震荷载下黄土边坡的失稳与动力响应。然而，现有模型土制备技术仍存在关键短板。由表1可知，满足相似律的模型材料通常要求具备高容重、低强度、低弹模的特征，在模型材料密度和内摩擦角需与原型保持一致时，现有制备工艺难以调配满足相似比要求的超低黏聚力材料[16]。此外，当采用重塑土或配制土模拟原型黄土边坡时，难以还原原状黄土裂缝和大孔隙的结构[23-24]。

2　地震单独作用下黄土边坡的峰值加速度放大效应

2.1　加速度放大效应的影响因素

在地震作用下，PGA放大效应是黄土滑坡的重要动力特征，也是影响黄土边坡失稳的核心动力因素之一。由表2可知，大量振动台试验表明，该效应受地震波特性（方向、频谱、幅值）、边坡几何形态（坡高、裂隙）、土层结构（厚度、组成）以及环境因素（如季节性冻融作用）等多种因素的耦合影响。

地震波的方向与频谱特征显著影响边坡的动力响应。以往研究表明，水平方向地震波较垂直或复合波（水平-垂直）对边坡的变形与加速度响应更为显著，导致更强的PGA放大效应[25-26]；当振动台输入地震波的频谱与黄土边坡场地的自振周期接近时，会引发共振，从而显著增强PGA放大效应[27]。

边坡几何形态显著影响PGA放大效应：PGA放大系数随坡高非线性增加[28]，并在坡顶达到最强，在裂隙边坡中更显著[25]。例如，Wu等[25]通过振动台试验发现，裂隙边坡肩部的PGA放大系数为坡脚的2.9倍，而无裂隙边坡为2.4倍；赵多银[29]通过振动台对比模型试验，发现裂隙边坡的放大效应约为完整边坡的1.2倍；李福秀等[30]针对黄土塬边坡开展振动台试验，指出裂隙倾角越大，坡体刚度退化越显著，坡顶及裂隙尖端的放大系数越大。此外，液化夹层为PGA响应分界点，其下方加速度系数随高程非线性增长，上方则逐渐衰减[31]，这是因为液化层吸收耗散了地震能量，从而降低上部土体的加速度响应[32-33]。PGA放大效应还受土体性质与土层结构影响。例如，Yu等[34]通过振动台试验发现，黄土层比泥岩更易发生能量集中与变形放大：加速度从0.1g增至0.5g时，黄土层PGA放大系数由1.59增至2.56；而同样厚度下的泥岩层，仅由1.05增至1.25；张泽林等[35]通过离心机振动台试验与数

表2 地震黄土滑坡振动台试验的部分研究总结

Table 2 Summary of selected studies on shaking table tests of seismic loess landslides

研究者	研究区域	试验主题	振动台尺寸(长×宽)/m	模型箱(长×宽×高)/m	输入波形	结论
Huang等[14]	黄土高原汶川地震	黄土-泥岩边坡破坏	2.5×1.4	2.5×1.4×1.5	岷县波、Kobe和El-Centro波	PGA放大效应受断层结构影响,断层带的存在会加剧上盘的PGA放大效应
Wu等[25]	甘肃省平凉市	裂缝影响	4×6	2.8×1.4×1.8	汶川—唐禹波和El-Centro波	PGA放大效应受坡体裂隙影响,裂隙的存在会显著增强边坡的位移与PGA放大效应
Yue等[26]	西北高铁隧道黄土坡	含隧道的陡黄土边坡破坏	4×6	2.8×1.4×1.9	汶川—唐禹波和El-Centro波	PGA放大效应受地震波加载方向影响,X向地震波较X-Z向PGA放大效应更强
杨博[31]	基于12个黄土地区	可液化层边坡破坏	4×6	2.8×1.4×1.8	El-Centro波与汶川波	PGA放大效应受液化夹层影响,其显著的滤波作用会明显减弱上覆土体的放大响应
Yu等[34]	青海省张家庄滑坡	反倾断层影响	4×4	2.6×1.4×1.5	岷县波、Kobe和El-Centro波	PGA放大效应受逆倾断层结构影响,逆倾断层带导致边坡加速度放大
Chen等[36]	甘肃省岷县布子滑坡	黄土-泥岩滑坡	4×6	2.8×1.4×1.0	岷县波	PGA放大效应受地形与地震强度影响,强震下低频能量在坡肩处的放大与聚集更显著
Sun等[41]	宝兰客运专线	边坡和隧道	4×6	2.8×1.4×1.8	El-Centro波和汶川唐禹波(水平方向)	PGA放大效应受地下隧道等空洞结构影响,其存在会显著增强周边边坡的放大效应
蒲小武[42]	甘肃兰州地区	斜坡地震损伤破坏	4×6	2.82×1.42×1.5	岷县波和汶川—天水波	PGA放大效应受地震动频谱影响,地震波频率与斜坡自振频率越接近,放大效应越显著

值模拟指出黄土层的加速度放大系数比泥岩层分别高出0.5～0.7(水平)与0.4～0.6(垂直)倍(0.1g水平振动);文献[36-37]研究发现,黄土层增厚会延长场地自振周期且易诱发共振,显著放大地震响应,当厚度从50 m增至110 m时,PGA放大系数由1.52升至2.34。

此外,季节性冻融作用可增强边坡的地震响应。Jing等[38]通过试验发现,冻融边坡的PGA放大系数较未冻融边坡高出40%～70%,在冻胀区尤为显著;Wu等[39]在冻融环境下开展试验,发现坡肩位置放大系数提升约43.2%;Yuan等[40]指出,边坡经历4次冻融循环会显著增强坡顶PGA放大效应:其诱发的渐进性损伤深度(约30 cm)大于冻结深度(约10 cm)。该损伤同步放大了未冻土层的加速度响应,显著加剧了寒区黄土边坡的地震失稳。

2.2 加速度放大效应的估算

表3总结了现有学者提出的PGA放大效应经验公式。现有公式以土层厚度为核心影响参数,部分公式进一步纳入震级、震中距与等效剪切波速等关键因子。其中,陈拓等[43]通过Q_3马兰黄土与Q_4

表3 PGA放大效应相关经验公式概括

Table 3 Summary of empirical formulas related to the PGA amplification effect

研究者	考虑因素	经验公式	适用范围
陈拓等[43]	土层厚度H	PGA放大系数$=aln(H)b$	兰州地区
石玉成等[44]	土层厚度H	PGA放大系数$=K_S(0.01H+1.6)$	一般黄土场地(除软弱夹层场地及覆盖层厚的场地)
杨帆等[45]	震级M和距离R	水平向:PGA放大系数$=2.639-0.258M+0.003\,9R$ 竖直向:PGA放大系数$=2.639-0.258M+0.001\,9R$	陕西、甘肃、青海、宁夏等中国西部黄土区
陈党民等[46]	土层厚度H与等效剪切波速v_{Se}	PGA放大系数$=10^a+H^b+v_{Se}^c$	西安地区,v_{Se}=145～421 m/s,H=50～76 m

注:K_S=土层结构附加影响系数;a、b、c为拟合参数。

全新世黄土状土的现场波速测试，发现兰州黄土场地 PGA 放大系数与覆盖层厚度（H）的对数呈正相关关系；石玉成等[44]结合 Q_1午城黄土、Q_2离石黄土、Q_3马兰黄土、Q_4全新世黄土等剖面特征与室内试验数据，构建了黄土场地 PGA 放大效应经验公式，在土层厚度（H）的基础上引入土层结构附加系数，可有效表征砂砾夹层、软弱夹层等不同土层组合的影响；杨帆等[45]依托汶川地震实测记录，并借鉴美国西部黄土区研究成果，建立了兼顾震级（M）与震中距（R）的中国黄土区 PGA 放大系数经验公式；陈党民等[46]基于西安地区钻孔与剖面实测资料，提出了综合考虑土层厚度（H）与等效剪切波速（v_{Se}）的 PGA 放大系数计算公式。总体而言，现阶段 PGA 放大效应快速评估方法已由单一几何变量逐步发展为多维度物理参量耦合评估体系，可综合反映多项影响因子的作用机制。

现有研究已初步揭示黄土场地 PGA 放大效应的非线性分布规律与多因素影响特征，但多因素耦合作用下黄土边坡 PGA 放大机理仍有待深入探究。未来需构建兼顾地震波特性、土层结构、地形高程、冻融环境等多重条件的 PGA 放大效应计算方法与预测模型，可通过融合振动台滑坡试验、野外原位观测大数据，并结合人工智能算法，为高精度预测模型的构建提供技术支撑。

3　考虑地震与降雨耦合作用的黄土滑坡振动台试验研究

在自然环境中，黄土边坡常面临地震与降雨的共同作用。相较于单一地震作用，强震引发的不可逆微观结构损伤可显著削弱土体的抗侵蚀能力。震后现场监测与多尺度物理模型试验证实，经历强震扰动后，湿陷性黄土边坡失稳的临界降雨阈值显著降低（降幅可达 30%～40%）[47]。该震后阈值劣化效应使坡体在震后常规降雨条件下极易发生二次灾害。

暴雨与地震诱发的滑坡呈现不同的分布模式。例如，Densmore 等[48]发现地震诱发滑坡集中在山脊附近，而地下水渗透作用使暴雨诱发滑坡主要发生在斜坡底部；Qiu 等[49]对比量化了多国不同地区暴雨与地震诱发滑坡的特征，发现地震诱发滑坡较暴雨诱发滑坡面积更大、形状更紧凑且更接近圆形，复杂度更低。目前尚缺乏降雨与地震耦合作用下滑坡分布特征的研究。

根据地震与降雨发生的时序差异，可将边坡破坏分为“地震-降雨-滑坡”和“降雨-地震-滑坡”两种模式，二者规律存在差异，如表 4 所列。例如，Pu 等[11,50]发现微量降雨叠加强震主要诱发以垂直沉降为主的“震陷破坏”，随着含水率升高，破坏模式逐

表 4　关于地震与降雨耦合作用下滑坡振动台试验研究的概括

Table 4　Summary of shaking table test studies on landslides under earthquake-rainfall coupling

雨震耦合	研究者	振动台尺寸（长×宽）/m	模型箱（长×宽×高）/m	土体类型	坡度/(°)	降雨条件	试验结论
降雨-地震	Feng 等[52]	4×2	3.7×1.5×2.1	配制土	36	降雨量 40 mm	破坏经历坡顶张拉-坡脚剪切-整体失稳，呈拉-剪失效模式
	Ren 等[54]	2.5×0.4	2.5×0.4×1.0	配制土	14	降雨强度 4.2 mm/h，持续 4.5 d	0.6g 地震作用下，发生黄土剪切-液化-滑移
	Chen 等[55]	3.36×4.86	2.8×1.4×1.8	配制土	约 24.8	注水至水稳定地从坡趾流出	高含水层孔隙水压提高，抗剪强度降低致界面滑动破坏
	尹小军[56]	4×6	2.82×1.4×1.0	重塑土	20	降雨强度 20 mm/h	黄土遇水软化，震前降雨降低临界加速度并放大位移
	王兰民等[57]	4×6	3.0×1.5×1.2	重塑土	约 20	降雨强度 10 mm/h，降雨量 100 mm	降雨加剧震动响应及变形，导致液化滑移
	王兰民等[64]	4×6	2.8×1.4×1.0	重塑土	18	降雨强度 100 mm 使表层饱和	表层饱和黄土液化转化为泥流，形成液化流滑型滑坡
	Yang 等[59]	1.2×1.2	1.8×0.32×1.2	配制土	44	降雨强度 24 mm/h，三组：188min、310min、464min	降雨：启动-扩展-坡脚失稳；雨震耦合：微滑-启动-整体破坏
地震-降雨	Pu 等[50]	4×6	2.82×1.42×1.1	重塑土	20	降雨强度 20 mm/h，总雨量 10 mm	地震沉降，为剪切-滑动破坏模式
	蒲小武[61]	4×6	2.8×1.4×1.0	重塑土	20	20～200 mm/h	降雨软化表层，降低临界加速度

渐向水平向拉剪滑移转变[50-51]；Feng等[52]通过震前降雨振动台试验发现，基岩坡面位移集中于坡脚土-基岩界面；Meng等[53]发现暴雨条件下边坡位移集中于坡肩，小雨条件下则集中于坡脚；Ren等[54]研究发现，黄土边坡在降雨与地震耦合作用下位移主要集中于坡顶和坡脚。

地震与降雨耦合作用下，边坡的时空演化规律与破坏模式十分复杂。例如，Feng等[52]与Chen等[55]研究表明，雨震耦合作用下，二元结构边坡（如黄土-泥岩、黄土-基岩）的破坏模式受控于软弱结构面，结构界面抗剪强度率先降低，沿界面产生滑移，进而诱发整体失稳。在空间上，Feng等[52]指出坡面破坏始于坡顶张拉起裂，继而诱发坡脚剪切裂纹并逐渐扩展，导致边坡整体失稳，呈现拉剪复合失效模式；在运动形态上，尹小军[56]发现滑体失稳运动过程中呈现曲线滑移轨迹，且坡体内部存在纵横向位移差；在时间演化上，王兰民等[57]在雨强20 mm/h、100～650 gal逐级加载的试验条件下，揭示黄土边坡失稳破坏过程可分为“弹性动变形-残余变形快速增加-液化滑移”三个渐进阶段。

地震与降雨耦合作用下，边坡破坏的临界条件存在差异。Feng等[52]发现，40 mm降雨入渗使边坡破坏阈值由无雨时的0.4g（剪切裂缝）降至0.3g（剧烈拉-剪复合破坏），其机制在于孔压升高与有效应力降低放大了地震动效应；王兰民等[57]提出了“降雨量-地震强度”双控阈值，指出在100 mm降雨量条件下，0.6g为触发液化滑移的临界点。这表明，不同学者在雨震耦合条件下得出的临界条件数值差异（0.3g～0.6g），与降雨量导致的抗剪强度劣化程度有关。

“降雨-地震-滑坡”过程中，边坡一般经历降雨入渗、水致弱化、临界失稳、地震触发失稳四个阶段，呈现“水致弱化-地震失稳”的演化特征。降雨使土体孔压升高、有效应力下降，抗剪强度与刚度显著劣化[58]。当后续地震动叠加使边坡达到极限状态时，即发生瞬时失稳，PGA放大效应随之急剧上升至峰值，随后因滑体解体与能量耗散而迅速衰减[59]。

“地震-降雨-滑坡”过程中，边坡依次经历地震损伤、渗流加剧、水力侵蚀与渐进破坏四个阶段，属于“地震损伤-水力侵蚀”模式。地震诱发的微观损伤与宏观裂隙为后续降雨提供了优势渗流通道[60]，雨水快速入渗不仅引发孔压激增，伴随的水力侵蚀更会加速滑带软化，导致抗剪强度骤降。

值得注意的是，震后适度降雨可能对黄土小型裂隙具有愈合作用。蒲小武[61]通过振动台试验发现，强震后若仅产生小型裂隙且降雨量≤100 mm，细颗粒物质随入渗水流充填裂隙，可促进其闭合，从而在一定程度上增强坡体整体稳定性。相反，Bontemps等[62]发现，高含水状态下的小震会延缓土体愈合，其原因可能在于震动破坏了颗粒胶结并扰乱了孔压场。土体强度随不同地震与降雨强度的变化规律仍需深入研究。

现有研究多针对“降雨-地震-滑坡”或“地震-降雨-滑坡”单一时序开展，而关于地震与降雨不同时序对黄土边坡耦合作用影响的系统研究较少。Hu等[63]在同等试验条件（150 mm降雨、0.15g加速度）下发现，“地震＋降雨”使边坡安全系数下降56.2%，高于“降雨＋地震”的45.8%，表明震后降雨对边坡失稳的影响更为显著。然而，仍需进一步系统对比不同降雨强度、地震强度及其耦合时序对黄土坡体稳定性的影响，明确不同强度降雨对黄土边坡裂隙的愈合机制。

4 黄土液化滑坡机理及滑移距离预测

4.1 黄土液化滑坡机理

前文已探讨地震单独作用以及雨-震耦合条件下黄土边坡的失稳模式，而液化滑坡作为黄土地震灾害的典型破坏类型，其发生机制与致灾范围仍有待系统梳理。为此，本节对黄土液化滑坡的形成机理及滑坡体滑移距离预测方法开展综述。

从液化机理来看，黄土具备大孔隙、弱胶结的特殊结构，易在坡体内部形成排水条件受限的局部滞水区域[64]。地震产生的循环剪切荷载作用下，土体发生体积压缩而排水受阻，孔隙水压力不断累积、有效应力快速衰减；当孔隙水压力趋近于初始有效应力时，土体抗剪强度大幅下降，进入近似流态化状态，该现象即为黄土液化[65-66]。

黄土液化行为直接受土体含水量与结构特征控制：高饱和度环境会显著降低液化触发阈值，而低饱和度条件下土体一般不易发生液化。黄土地震液化多出现于空间分层型边坡内部。例如，杨博[31]通过黄土边坡振动台试验发现，地震动能在液化夹层内发生明显耗散，形成局部高能耗散带；董建华等[33]的试验表明，夹层发生液化后PGA放大系数明显减小，并在层间界面发育连续滑移剪切

带，成为滑坡启动的主控层位。

地震动参数同样对黄土液化特征存在重要影响。地震动幅值增大将加快孔隙水压力上升，孔压比快速趋近于1.0，造成有效应力丧失，液化区域由局部饱和带快速向坡体内部扩展，改变边坡的动力传递路径与应力状态[32,54-55]。时间维度上，已有研究表明[67-68]，地震动持时越长，饱和黄土内部孔隙水压力累积越充分，越易于触发液化。频率特征方面，低频地震波会促进动孔压增长与土体强度劣化，甚至诱发共振效应[69]；高频振动下孔压增长驱动力不足，土体需要经历更多次循环剪切作用，才能够达到液化破坏状态[69-70]。

地震诱发黄土液化可划分为三个演化阶段：(1)能量积累阶段：地震动输入的应变能在高饱和、排水不畅的局部区域集聚，黄土逐步形成高能量、弱排水的环境；(2)孔压突增阶段：受土体压缩与排水受限共同作用，孔压比快速抬升，当外部输入能量接近或超过临界耗散能时，坡体内率先形成局部高孔压区；(3)流态化滑移阶段：有效应力趋于零导致土体抗剪强度丧失，剪切滑移面沿可液化层与结构界面逐步贯通，土体呈现流态化滑移特征。黄土液化滑坡表现为土体抗剪强度下降、等效摩擦阻力减小、滑移能力显著增强，部分滑坡由此产生长距离运动。

现有黄土液化滑坡振动台试验多聚焦液化临界条件与滑坡演化过程，但针对液化过程土体微观孔隙结构演化，及其与边坡宏观失稳临界阈值之间的关联研究尚较为薄弱，仍需进一步开展黄土液化细观结构演化与宏观动力响应耦合机理研究，揭示黄土液化流滑的内在物理机制。

4.2　黄土滑坡滑移距离预测

黄土滑坡的滑移距离是灾害评估的重要参数，目前其快速评估主要依赖经验关系。表5总结了地震黄土滑坡滑移距离的经验公式，公式主要基于1920年海原M_S8.5和1654年天水M_S8.0地震的滑坡数据拟合而成。

由表5可知，现有关于黄土滑坡滑移距离(L)经验公式大体可分为两类：一类以单一几何指标为自变量，如坡高H或滑体体积V，建立其与滑移距离L的单因素模型，或者建立等效摩擦系数$\mu=H/L$与V的相关关系；另一类是综合考虑坡高、体积、坡度、坡长和形态比等多参量的多因素模型，以反映多控制因素的综合影响。

从坡高H与滑移距离L的关系式($L\propto H^b$)来看，多数研究得到幂律指数b介于0.9～1.3[4,71-72]；从滑坡体积V与滑移距离L的关系式($L\propto V^b$)来看，不同公式中幂律指数b在0.2～0.4[71,73-74]，说明体积增大有利于滑移距离增加。需要注意的是，$L\propto V^b$的拟合优度在非液化型黄土地震滑坡的样本中，相关系数可达0.7左右[74]，而在含液化型滑坡的样本中，该式的拟合精度相对偏低[73-75]，说明液化程度等因素对滑坡滑移距离产生影响。

在等效摩擦系数μ与滑坡体积V的关系式($\mu=aV^b$)中，不同研究得到的指数b介于-0.1～-0.3之间，说明滑体体积增大往往伴随等效摩阻减小，滑坡体更易发生远程滑移。此外，基于黄土液化滑坡样本得到的b的绝对值更大，海原地震降雨耦合滑坡的数据拟合得到$b=-0.28$[4]，如表5所列。段钊等[76]根据泾河南塬降雨液化滑坡的58个滑坡数据拟合得到$b=-0.51$($\mu=7.380V^{-0.510}$，$R^2=0.75$)，说明降雨引起滑坡的等效摩阻下降。现有研究还建立了L与多因素(如坡高、体积、坡度、坡长及形态比等)的关系，反映了滑坡过程中多因素的复杂影响[77]。然而，滑坡的影响因素众多，难以全面获取相关资料，目前滑坡距离公式仍以第一类为主，即滑坡距离与坡高、滑坡体积等单因子的关系[78-80]。

基于表5中的文献，本文收集了1 905组地震滑坡与220组地震和降雨耦合诱发的黄土滑坡的数据集，每组数据包含滑坡体积和等效摩擦系数，如图1所示。地震滑坡的等效摩擦系数总体小于地震与降雨耦合作用引起的滑坡，前者μ主要集中在0.1～0.4(占地震引起的滑坡数量的97.3%)，后者μ变化范围较大，在0～0.9波动明显，68.4%的数据在0.2～0.6，最大μ值明显大于地震滑坡对应的μ值。

此外，地震诱发滑坡的规模普遍更大，体积V主要分布在10^5～10^8 m^3(占地震引起的滑坡数量的95.4%)，而地震-降雨耦合作用诱发的滑坡中，96.3%的滑坡体积$<10^6$ m^3。对于地震引起的滑坡，当滑坡体积$<10^8$ m^{3}时，等效摩擦系数变化较大；当滑坡体积$>10^8$ m^{3}时，等效摩擦系数在0.15附近波动。

基于滑坡体积与等效摩擦系数之间的关系，得到地震触发滑坡及地震与降雨耦合引起的滑坡的

表 5 滑坡滑移距离的计算公式汇总

Table 5 Summary of calculation formulas for landslide runout distance

公式类型		经验公式	事件(数据量)	R^2	参考文献
L与H	$L=a+bH$	$L=7.644H-59.389$	海原(—)a	0.53	参考文献[73]
	$L=aH^b$	$L=2.074H^{1.127}$	天水(745)a	0.70	参考文献[71]
		$L=8.308H^{0.935}$	海原(57)a	-	参考文献[4]
		$L=2.227H^{1.255}$	海原(568)a	0.78	参考文献[72]
		$L=7.023H^{1.042}$	海原(568)a	0.67	参考文献[72]
		$L=10.447H$	海原(141)b	0.97	参考文献[75]
L与H	$L=aV^b$	$L=102.348V^{0.359}$	天水(745)a	0.79	参考文献[71]
		$L=1.496V^{0.408}$	海原(—)a	0.34	参考文献[73]
		$L=55.273V^{0.407}$	海原(568)a	0.74	参考文献[74]
		$L=82.476V^{0.191}$	海原(141)b	0.22	参考文献[75]
μ与V	$\mu=aV^b$, $\mu=L/H$	$\mu=2.550V^{-0.347}$	海原(18)b	-	参考文献[78]
		$\mu=0.727V^{-0.280}$	海原(57)b	-	参考文献[4]
		$\mu=6.080V^{-0.263}$[式(1)]	海原(39)a	-	参考文献[78]
		$\mu=0.635V^{-0.188}$[式(2)]	天水(745)a	0.60	参考文献[71]
		$\mu=0.297V^{-0.188}$[式(3)]	海原(568)a	0.60	参考文献[71]
		$\mu=0.353V^{-0.183}$[式(4)]	海原(568)a	0.62	参考文献[74]
		$\mu=0.416V^{-0.190}$[式(5)]	海原(57)a	-	参考文献[4]
L与多因素		$L=11.422+0.321x_1+8.231x_2+90.210\frac{x_2}{x_1}$,$x_1$,$x_2$分别为坡度、坡长	海原(141)b	0.83	参考文献[75]

注:"-"表示未有数据记录;海原和天水分别指海原地震和天水地震;a:地震诱发滑坡数据;b:地震与降雨耦合引起滑坡数据。

拟合关系分别为[图 1(b)]:

$$H/L=0.368V^{-0.116}\ (R^2=0.31,\text{地震滑坡}) \quad (1)$$

$$H/L=2.079V^{-0.541}\ (R^2=0.35,\text{地震降雨耦合滑坡}) \quad (2)$$

对比可知,式(2)中 V 的指数的绝对值更大,表明滑移距离随体积呈现更为陡峭的增长趋势,反映了在高含水条件下等效摩阻随体积快速衰减。

图 1(c)展示了采用表 5 中 5 个公式($\mu=aV^b$)计算 1 905 组地震引起的黄土滑坡数据集的计算结果,本文拟合公式[式(1)]及表 5 中式(4)预测效果相对较好。但可以看到,各经验公式的拟合结果离散度普遍较大。究其原因:一方面,不同研究所采用数据集的来源、样本数量与数据质量存在明显差异;另一方面,实际滑坡案例的地震动强度、场地条件、土体含水率等影响因素差异显著,而完整的配套观测资料往往难以获取,致使现有滑移距离经验公式预测效果有限,普适性较差。后续研究可综合考虑地震波激励特征、土体性质、含水率等多因子的影响,进一步提高滑坡滑移距离计算公式的理论基础与工程适用性。

5 结论与展望

本文围绕黄土滑坡振动台试验及滑坡形成机理,系统梳理了振动台试验的模型相似设计、试样制备手段,总结了地震、地震-降雨耦合作用下黄土边坡的动力响应特征,并归纳黄土液化滑坡机理与滑移距离计算方法,得到主要结论如下:

(1) 地震单独作用时,黄土边坡 PGA 放大效应受坡体高程、裂隙发育程度、土层厚度、地震波参数、地形边界、液化层及冻融作用等多重因素共同控制。已有研究表明,PGA 放大系数随坡高呈非线性增大,在坡顶位置达到最大值;裂隙发育会进一步加剧放大效应;水平向地震波的放大作用更为突出,当地震波频谱与边坡自振周期接近并产生共振时,放大效应尤为显著。此外,坡内液化层具备滤波效应,会使上覆土体的 PGA 响应明显衰减。

(2) 地震与降雨的作用时序对边坡动力响应具有重要影响。震前降雨会弱化土体强度,短时强降雨易直接引发滑动破坏,持续降雨则更易发展为流滑;地震产生的裂隙为雨水入渗提供优势通道,会增大滑坡风险,但小规模裂隙在适度降雨条件下

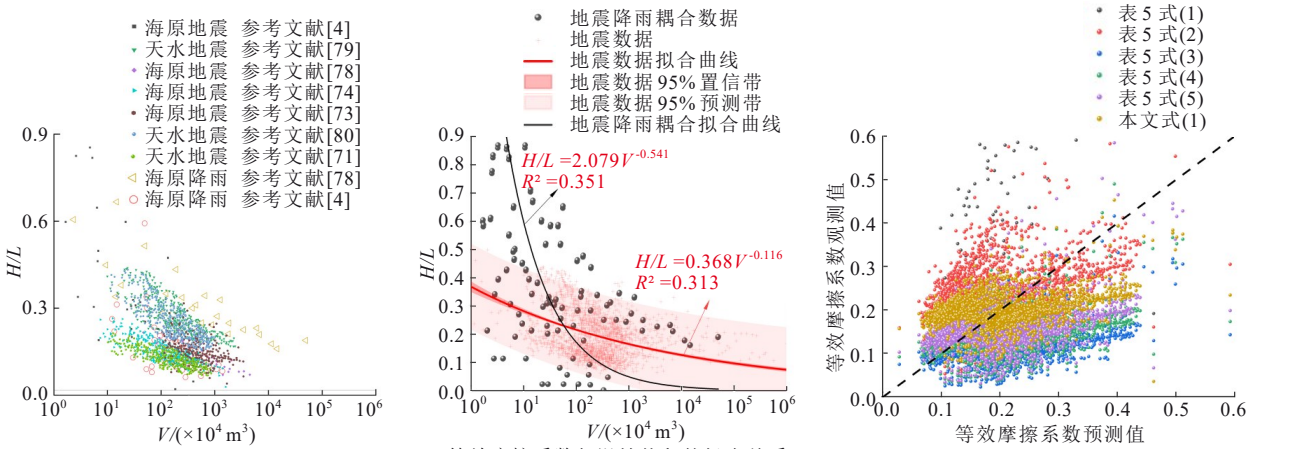


图 1　地震及地震与降雨耦合引起的滑坡的等效摩擦系数

Fig. 1　Equivalent friction coefficients of landslides induced by earthquakes and earthquake-rainfall coupling

存在自愈现象。强震还会降低后续降雨诱发滑坡的临界阈值。“降雨-地震-滑坡”模式中，雨水入渗造成边坡土体强度弱化，再由地震扰动触发失稳，属于水致弱化-地震失稳模式；“地震-降雨-滑坡”模式中，强震扰动破坏土体结构、催生大量裂隙，后续降雨通过渗流侵蚀进一步劣化边坡稳定性，属于地震损伤-水力侵蚀模式。两类路径均可诱发滑坡，但作用过程、失稳机理及防控对策各不相同，有待开展更为系统的对比研究。

（3）地震荷载作用下黄土内部孔隙水压力不断累积，当孔压比达到甚至超过临界阈值后，有效应力快速下降，土体抗剪强度大幅衰减，发生类流态转化，进而触发液化滑坡。试验与统计结果显示，边坡内部软弱夹层或液化带会阻碍地震能量向坡体上部传递。

（4）梳理现有黄土滑坡滑移距离计算公式可见：纯地震作用下，滑坡滑移距离与坡高的一次方、滑坡体积的 0.2～0.4 次方均呈正相关；等效摩擦系数随滑坡体积增大缓慢降低，滑移距离增长相对平缓。而在雨-震耦合工况下，水体介入大幅降低土体等效摩擦阻力，滑移距离表现出更为剧烈的非线性增长特征。

现有研究在黄土地震滑坡动力响应、雨震耦合致灾机理以及滑移距离演化规律方面已取得较多成果。但受物理模型试验尺度约束、多灾害耦合环境的复杂性、经验预测模型普适性不足等因素制约，黄土滑坡振动台相关研究仍存在诸多难点。后续可重点从以下方向开展研究：

（1）现阶段振动台试验往往难以完全满足相似准则，PGA 放大效应预测模型尚未综合考虑场地、环境等多因子的共同作用。今后需完善物理模型试验的相似设计，聚焦多因素耦合作用机理，融合大尺度模型试验与野外原位观测数据，构建能够综合反映地形高程、复杂土层结构、季节性冻融条件的加速度放大效应评价与预测体系。

（2）目前缺少对降雨-地震不同作用时序的系统性对比分析。后续应系统开展不同震级、降雨强度以及多种时序组合条件下的研究，揭示各类工况对黄土孔隙水压力演化、边坡动力响应及稳定性的综合影响。

（3）针对滑坡样本数据集质量参差不齐、现有滑移距离公式适用性受限等问题，需要构建涵盖场地条件、土体物性、地震动参数的高质量黄土滑坡数据库。在此基础上，厘清黄土液化演化过程与滑移距离之间的定量关联，建立物理内涵更明确、普适性更强的滑坡滑移距离预测模型。

参考文献（References）

[1] Zhuang J Q, Peng J B. A coupled slope cutting: a prolonged rainfall-induced loess landslide: a 17 October 2011 case study [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(4): 997-1011.

[2] Nowicki Jessee M A, Hamburger M W, Ferrara M R, et al. A global dataset and model of earthquake-induced landslide fatalities[J]. Landslides, 2020, 17(6): 1363-1376.

[3] 中国地震台网中心. 历史地震数据[EB/OL]. [2025-12-23]. http://www.ceic.ac.cn/history.
China Earthquake Networks Center. Historical earthquake data [EB/OL]. [2025-12-23]. http://www.ceic.ac.cn/history.

[4] Zhuang J Q, Peng J B, Xu C, et al. Distribution and character-

istics of loess landslides triggered by the 1920 Haiyuan earthquake, Northwest of China[J]. Geomorphology, 2018, 314(1): 1-12.

[5] Chen D H, Yuan R M, Wang P, et al. Preliminary study on the development characteristics and formation mechanism of the Zhongchuan Town liquefaction landslide-mudflow-blockage disaster chain induced by the 2023 Jishishan earthquake in Gansu Province[J]. Landslides, 2024, 21(10): 2467-2480.

[6] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684-691.
Peng Jianbing, Lin Hongzhou, Wang Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 684-691.

[7] Gao C H, Wang J Q, Yuan X B, et al. Review on the construction development and control technology of the shaking table [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Smart Infrastructure and Construction, 2021, 174(1): 22-31.

[8] 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 Fei, Yu Songbo, Li Bo, et al. Research advances on large-scale shaking table test for rock slopes under earthquake [J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4498-4512.

[9] 张建新, 吴恒川, 唐伟. 振动台试验下砂土液化相关特性的研究综述[J]. 四川建材, 2019, 45(6): 102-104.
Zhang Jianxin, Wu Hengchuan, Tang Wei. A review of studies on correlation characteristics of sand liquefaction under shaking table test [J]. Sichuan Building Materials, 2019, 45(6): 102-104.

[10] 赵文琛. 强震作用下黄土斜坡动力响应特征与稳定性分析[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2016: 70-75.
Zhao Wenchen. Dynamic response characteristics and stability analysis of loess slope under strong earthquake[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology,CEA, 2016: 70-75.

[11] Pu X W, Wan L M, Wang P. Initiation mechanism of mudflow-like loess landslide induced by the combined effect of earthquakes and rainfall[J]. Natural Hazards, 2021, 105(3): 3079-3097.

[12] 陈金昌, 王兰民, 王平, 等. 基于振动台试验的纯黄土边坡动力响应研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(2): 529-535.
Chen Jinchang, Wang Lanmin, Wang Ping, et al. Dynamic response of loess slopes based on the shake table test [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 529-535.

[13] 贾向宁, 黄强兵, 王涛, 等. 陡倾顺层断裂带黄土-泥岩边坡动力响应振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2721-2732.
Jia Xiangning, Huang Qiangbing, Wang Tao, et al. Shaking table test of dynamic responses of loess-mudstone slopes with a steep dip bedding fault zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2721-2732.

[14] Huang Q B, Jia X N, Peng J B, et al. Seismic response of loess-mudstone slope with bedding fault zone[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 371-380.

[15] 苏文德, 周建军. 厦门地区含盐地层冻土力学性能试验研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(1): 27-31.
Su Wende, Zhou Jianjun. Experimental study on mechanical properties of salt-bearing frozen soil in Xiamen, China [J]. Tunnel Construction, 2016, 36(1): 27-31.

[16] 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 Shaofeng, Wang Ping, Guo Haitao, 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.

[17] 张延杰, 王旭, 梁庆国, 等. 湿陷性黄土模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 4019-4024.
Zhang Yanjie, Wang Xu, Liang Qingguo, et al. Development of model test similar material of collapsible loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 4019-4024.

[18] 董金玉, 杨继红, 杨国香, 等. 基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 44-49.
Dong Jinyu, Yang Jihong, Yang Guoxiang, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 44-49.

[19] 王银梅, 高立成. 黄土化学改良试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 1071-1077.
Wang Yinmei, Gao Licheng. Experimental research on chemical improvement of loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 1071-1077.

[20] 李志清, 余文龙, 范林峰, 等. 改良黄土强度特性与工程处置试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(1): 116-121.
Li Zhiqing, Yu Wenlong, Fan Linfeng, et al. Experimental research on strength characteristics and engineering treatment of improved leoss soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(1): 116-121.

[21] Wang G X, Wu Z J, Zhang X H, et al. Experimental study on dynamic response characteristics and failure modes of rainfall and non-rainfall loess high steep slopes under earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025, 199: 109706.

[22] 孙文, 梁庆国, 乔向进, 等. 不同失稳形态黄土边坡的动力响应研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(6): 123-130.
Sun Wen, Liang Qingguo, Qiao Xiangjin, et al. Study on dynamic response of loess slopes with different failure patterns [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(6): 123-130.

[23] 韦雅之, 姚志华, 种小雷, 等. 非饱和Q_3黄土微细观结构特征及对强度特性影响机制[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(11): 2127-2133.

Wei Yazhi, Yao Zhihua, Chong Xiaolei, et al. Microstructural properties of unsaturated Q_3 loess and their influence mechanisms on strength properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(11): 2127-2133.

[24] 巩多有, 党振锋, 王建东. 新型固化剂改良黄土研究现状及展望[J]. 土木工程, 2022, 11(8): 963-973.
Gong Duoyou, Dang Zhenfeng, Wang Jiandong. Research status and prospect of new curing agent for loess improvement[J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2022, 11(8): 963-973.

[25] Wu Z J, Zhang D, Wang S N, et al. Dynamic-response characteristics and deformation evolution of loess slopes under seismic loads[J]. Engineering Geology, 2020, 267: 105507.

[26] Yue J P, Liang Q G, Fan C T, et al. Dynamic response characteristics of a steep loess slope with a tunnel under earthquake action[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(5): 164.

[27] Pu X W, Wang L M, Wang P, et al. The response law of far-field seismic ground motion of the Wenchuan earthquake and its damaging mechanism in the Loess Plateau[J]. Earthquake Research Advances, 2022, 2(3): 100114.

[28] 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 Xianlong, Liao Xin, Shi Yanqiu, 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.

[29] 赵多银. 地震作用下裂隙发育黄土塬斜坡失稳破坏模式与稳定性预测[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2019: 57-58.
Zhao Duoyin. Failure model and stability prediction of loess plateau slope with cracked under earthquake[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology,CEA, 2019: 57-58.

[30] 李福秀, 吴志坚, 严武建, 等. 基于振动台试验的黄土塬边斜坡动力响应特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2880-2890.
Li Fuxiu, Wu Zhijian, Yan Wujian, et al. Research on dynamic response characteristics of loess tableland slopes based on shaking table test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(9): 2880-2890.

[31] 杨博. 黄土地区含可液化层边坡地震动力响应分析[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2021:32-33.
Yang Bo. Seismic dynamic response analysis of slope with liquefiable layer in loess area[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology,CEA, 2021:32-33.

[32] Ma W G, Wang L M, Chen W W, et al. Investigation of the liquefying characteristics of saturated loess surrounding tunnels under seismic loading based on large-scale shaking table tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 159: 106465.

[33] 董建华, 杨博, 田文通, 等. 黄土地区含可液化层边坡地震动力响应振动台试验研究[C]// 中国振动工程学会.第十五届全国振动理论及应用学术会议论文集(NVTA2023).成都: 西南交通大学,2023: 260.
Dong Jianhua, Yang Bo, Tian Wentong, et al. Shaking table test study on seismic dynamic response of slopes with liquefiable layers in loess area[C]//Chinese Society for Vibration Engineering. Proceedings of the 15th National Conference on Vibration Theory and Applications (NVTA2023). Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023: 260.

[34] Yu T F, Huang Q B, Kang X S, et al. On seismic response of loess-mudstone slope with underlying anti-dip fault zone: laboratory investigation using shaking table test[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(4): 117.

[35] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 地震波振幅对黄土-泥岩边坡动力响应规律的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2403-2412, 2450.
Zhang Zelin, Wu Shuren, Wang Tao, et al. Influence of seismic wave amplitude on dynamic response of loess-mudstone slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2403-2412, 2450.

[36] 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.

[37] Wang L M, Wu Z J, Xia K, et al. Amplification of thickness and topography of loess deposit on seismic ground motion and its seismic design methods[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105090.

[38] 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.

[39] Wu Z J, Jing J J, Lu Y, et al. Study on dynamic response characteristics of compacted loss slope under freeze-thaw cycles and earthquake loads[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 220: 104137.

[40] Yuan G L, Wu Z J, Che A L, et al. Damage evolution mechanism of loess slope under the combination of freeze-thaw cycles and earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 166: 107778.

[41] Sun W Y, Yan S H, Ma Q G, et al. Dynamic response characteristics and failure mode of a bias loess tunnel using a shaking table model test[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 31: 100659.

[42] 蒲小武. 震损黄土斜坡稳定性演化机制与应急评价方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023:54-67.
Pu Xiaowu. Study on stability evolution mechanism and emergency evaluation method of earthquake-damaged loess slope[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023:54-67.

[43] 陈拓, 吴志坚, 王平. 兰州黄土场地地震动参数量化研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(1): 166-171.

Chen Tuo, Wu Zhijian, Wang Ping. Quantitative analysis of ground motion parameter of Lanzhou loessial sites[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 166-171.

[44] 石玉成, 王兰民, 张向红. 黄土场地不同土层结构对地震地面运动参数的影响[C]// 中国地质学会工程地质专业委员会. 第六届全国工程地质大会. 北京: 科学出版社, 2000: 362-365.
Shi Yucheng, Wang Lanmin, Zhang Xianghong. Influence of different soil-layer structures of loess sites on seismic ground-motion parameters[C]//Engineering Geology Committee of Geological Society of China. Proceedings of the 6th National Conference on Engineering Geology. Beijing: Science Press, 2000: 362-365.

[45] 杨帆, 罗奇峰, 李炳乾, 等. 基于汶川地震的我国黄土地区加速度峰值衰减关系[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(10): 1487-1492.
Yang Fan, Luo Qifeng, Li Bingqian, et al. Acceleration peak attenuation relationship of loess region in northwestern China on the basis of Wenchuan earthquake[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(10): 1487-1492.

[46] 陈党民, 段蕊. 场地条件对地表峰值加速度的放大效应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(1): 24-30.
Chen Dangmin, Duan Rui. Amplification effects of site conditions on ground peak accelerations[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(1): 24-30.

[47] Wang Y L, Wang P, Chang W B, et al. Hazard assessment of seismic-collapsed loess landslides on the Loess Plateau as exemplified by the *M*6.2 earthquake in Jishishan County, China[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12: 1402922.

[48] Densmore A L, Hovius N. Topographic fingerprints of bedrock landslides[J]. Geology, 2000, 28(4): 371.

[49] Qiu H J, Su L L, Tang B Z, et al. The effect of location and geometric properties of landslides caused by rainstorms and earthquakes [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2024, 49(7): 2067-2079.

[50] 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.

[51] 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.

[52] Feng H Z, Jiang G L, He Z L, et al. Dynamic response and failure characteristics of a slope with bedrock subjected to earthquakes and rainfall in shaking table tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(7): 265-279.

[53] Meng W Z, Yuan S Y, Jiang G L. Dynamic response mechanisms and damage analysis of slopes via wave theory and rainfall shaking table tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(6): 7067-7085.

[54] Ren J, Sun P, Zhang S, et al. Experimental study on the failure mechanism of the Zhoujiashan landslide under the combined effect of rainfall and earthquake in Tianshui City, Northwest China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(12): 436-443.

[55] Chen J C, Che A L, Wang L M, et al. Investigating the failure mechanism of loess-mudstone landslides with a high water content interface subjected to earthquakes through the shaking table test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 177: 108406.

[56] 尹小军. 降雨与地震耦合作用下黄土边坡稳定性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2020:127-128.
Yin Xiaojun. Study on stability of loess slope under the coupling effect of rainfall and earthquake[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2020:127-128.

[57] 王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 地震和降雨耦合作用下黄土边坡失稳滑移的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊2): 3873-3883.
Wang Lanmin, Pu Xiaowu, Wu Zhijian, et al. Shaking table test study on instability and slip of loess slope under the coupling action of earthquake and rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 3873-3883.

[58] 钟佩文, 张慧莉, 田堪良, 等. 持续降雨入渗对黄土边坡稳定性的影响[J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 76-81.
Zhong Peiwen, Zhang Huili, Tian Kanliang, et al. Study on the influence of continuous rainfall infiltration on the loess slope stability[J]. Yellow River, 2018, 40(1): 76-81.

[59] Yang B, Hou J R, Zhou Z H, et al. Failure behavior and mechanism of a slope under the action of earthquake after rainfall[J]. Natural Hazards, 2023, 116(3): 3685-3702.

[60] 许强, 彭大雷, 范宣梅, 等. 甘肃积石山M_S6.2地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 207-222.
Xu Qiang, Peng Dalei, Fan Xuanmei, et al. Preliminary study on the characteristics and initiation mechanism of Zhongchuan flowslide due to liquefaction triggered by the M_S6.2 Jishishan earthquake in Gansu Province[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(2): 207-222.

[61] 蒲小武. 地震和降雨耦合作用下黄土边坡失稳的大型振动台试验研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2016: 64-65.
Pu Xiaowu. Study on the instability of loess slope under earthquake and rainfall coupling action based on large shaking table model test[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 2016:64-65.

[62] Bontemps N, Lacroix P, Larose E, et al. Rain and small earthquakes maintain a slow-moving landslide in a persistent critical state[J]. Nature Communications, 2020, 11: 780.

[63] Hu T, Zhang M M, Gong L, et al. The mechanism of slope instability due to rainfall-induced structural decay of earthquake-damaged loess [J]. Earthquake Research

Advances, 2022, 2(3): 100137.

[64] 王兰民, 柴少峰, 薄景山, 等. 黄土地震滑坡的触发类型、特征与成灾机制[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(8): 1543-1554.
Wang Lanmin, Chai Shaofeng, Bo Jingshan, et al. Triggering types, characteristics and disaster mechanism of seismic loess landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(8): 1543-1554.

[65] 朱贵兵. 地震液化机理、判别及其危害性评价[J]. 工程技术研究, 2019, 4(2): 233-234.
Zhu Guibing. Mechanism, determination and hazard evaluation of seismic liquefaction[J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(2): 233-234.

[66] 陈国兴, 吴琪, Juang C H. 砂土液化不变性理论[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(6): 1311-1370.
Chen Guoxing, Wu Qi, Juang C H. Invariance theory of sand liquefaction under cyclic loadings[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45(6): 1311-1370.

[67] 邓龙胜. 强震作用下黄土边坡的动力响应机理和动力稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2010:97-98.
Deng Longsheng. Study on the response and stability mechanics of loess slope in environment of strong earthquake[D]. Xi′an: Chang′an University, 2010:97-98.

[68] 王家鼎, 张倬元, 李保雄. 黄土自重湿陷变形的脉动液化机理[J]. 地理科学, 1999, 19(3): 271-276.
Wang Jiading, Zhang Zhuoyuan, Li Baoxiong. A mechanism in loess self-load collapse: the saturated loess liquefaction caused by earth microtremors[J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(3): 271-276.

[69] Chai S F, Wang L M, Wang P, et al. Failure mechanism and dynamic response characteristics of loess slopes under the effects of earthquake and groundwater[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 814740.

[70] 杨振茂, 赵成刚, 王兰民. 饱和黄土液化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 864-871.
Yang Zhenmao, Zhao Chenggang, Wang Lanmin. Testing study on saturated loess liquefaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 864-871.

[71] 颜灵勇. 走滑断层控制的黄土地震滑坡效应研究[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2022:43-48.
Yan Lingyong. Effect of loess seismic landslides controlled by strike-slip fault[D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2022:43-48.

[72] 段俊杰, 李孝波, 周兴浩, 等. 黄土地震滑坡运动特征研究: 以海原特大地震诱发滑坡为例[J]. 地震工程学报, 2024, 46(5): 1151-1159.
Duan Junjie, Li Xiaobo, Zhou Xinghao, et al. Kinematic characteristics of loess seismic landslides: a case study of landslides triggered by the Haiyuan great earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(5): 1151-1159.

[73] 彭达. 海原特大地震诱发苏堡村黄土滑坡形成机理研究[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2018:46-48.
Peng Da. Study on the formation mechanism of subao seismic loess landslide induced by the 1920 Haiyuan earthquake[D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2018:46-48.

[74] 段俊杰. 海原特大地震诱发黄土滑坡运动学特征研究[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2024:40-43.
Duan Junjie. Study on the kinematic characteristics of loess landslides triggered by the Haiyuan great earthquake[D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2024:40-43.

[75] 王豪. 液化型黄土地震滑坡的运动学特征研究[D]. 西安: 长安大学, 2020:71-72.
Wang Hao. Research on kinematic characteristics of seismic landslide of liquefied loess[D]. Xi′an: Chang′an University, 2020:71-72.

[76] 段钊, 彭建兵, 王启耀. 泾阳南塬黄土滑坡的运动规律与液化效应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 46-49.
Duan Zhao, Peng Jianbing, Wang Qiyao. Motion law and liquefaction effect of loess landslides in south Jingyang Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(3): 46-49.

[77] Sun X P, Zeng P, Li T B, et al. A Bayesian approach to develop simple run-out distance models: loess landslides in Heifangtai Terrace, Gansu Province, China[J]. Landslides, 2023, 20(1): 77-95.

[78] Zhang D X, Wang G H. Study of the 1920 Haiyuan earthquake-induced landslides in loess (China)[J]. Engineering Geology, 2007, 94(1-2): 76-88.

[79] Li X B, Yan L Y, Wu Y W, et al. Distribution and characteristics of loess landslides induced by the 1654 Tianshui earthquake, Northwest of China[J]. Landslides, 2023, 20(12): 2775-2790.

[80] 张泽林. 典型黄土滑坡启动机制及成灾模式研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016:42-43.
Zhang Zelin. The initating mechanism and runout pattern of typical seismic loess landslides[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016:42-43.

(本文编辑:任　栋)