

# 海原大地震诱发黄土滑坡研究现状及展望

杨 顺

宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川

Email: yangshunyantu@126.com

收稿日期: 2021年7月5日; 录用日期: 2021年8月12日; 发布日期: 2021年8月18日

## 摘 要

1920年海原大地震在陇西地区诱发了大量的黄土地震滑坡,造成了惨重的人员伤亡和生态破坏,至今为止,黄土地震滑坡仍是陇西地区典型的地震地质灾害,数量多、灾害重,严重制约着陇西地区的工程建设和经济发展。多年来,我国广大科技工作者就海原大地震及其诱发的黄土地震滑坡开展了大量的研究工作,取得了丰富的成果。本文通过总结前人研究成果,对海原大地震诱发黄土地震滑坡的研究现状进行了总结和评述,梳理讨论了黄土工程特性的研究成果,归纳总结了黄土滑坡的分类,总结分析了海原大地震诱发黄土滑坡的分布规律、影响因素及发育机理,并对今后黄土地震滑坡需要研究的若干问题进行了讨论。通过本文的工作,期以对黄土地震滑坡的研究及陇西地区的工程建设能有一定的参考意义。

## 关键词

海原大地震,黄土地震滑坡,黄土工程特性,分布特征,影响因素,发育机理

# Research Status and Prospect of the Loess Seismic Landslide Induced by Haiyuan Earthquake

Shun Yang

Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia

Email: yangshunyantu@126.com

Received: Jul. 5<sup>th</sup>, 2021; accepted: Aug. 12<sup>th</sup>, 2021; published: Aug. 18<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The 1920 Haiyuan earthquake had coursed a lot of group nature loess seismic landslides in Longxi area. The landslides caused heavy casualties and serious ecological damage. Because of its large

文章引用: 杨顺. 海原大地震诱发黄土滑坡研究现状及展望[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(8): 1085-1092.

DOI: 10.12677/ag.2021.118104

quantity and severe disaster, it seriously restricted the construction and economic development in the Longxi area. For years, general scientific and technological workers in our country have carried out a lot of research work on the Haiyuan earthquake and the loess seismic landslide induced by it, and have achieved a lot of results. This paper has summarized and reviewed the research status of this field, which introduced the Haiyuan earthquake, tasted the progress of loess engineering properties, summarized the classification of loess seismic landslide, concluded the contributing factor of distribution regularities and developmental mechanism of loess landslide, and discussed some questions that need to be studied from now on in this field. According to the work of this paper, we hope that could put some certain reference for the study of loess seismic landslide and the engineering construction in Longxi area.

## Keywords

**Haiyuan Earthquake, Loess Seismic Landslide, Loess Engineering Properties, Distribution Regularities, Contributing Factor, Developmental Mechanism**

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

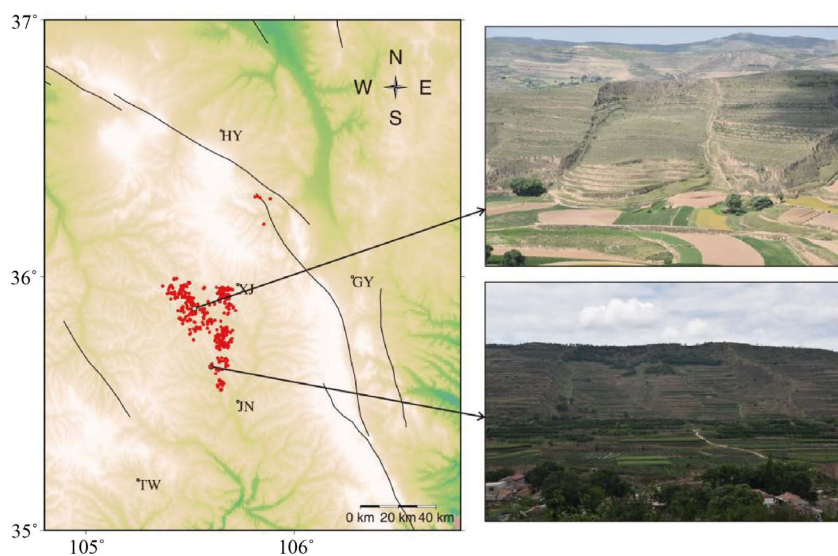
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

1920年12月16日晚8时,一场举世震惊的大地震发生在了干旱、贫瘠的海原县,此次地震震中位于海原县甘盐池,震级可达8.5级,震中宏观烈度达XII度。据史料描述,震时黄沙遮天、山崩地裂、江河堵塞、哀鸿遍野[1][2]。海原大地震在海原、西吉、静宁一带的黄土丘陵地区诱发了大量的黄土地震滑坡(如图1所示),笔者通过大量详细的野外滑坡调查发现,由于该地区降雨较少,致使区内滑坡保存完整,边界形迹清晰可见,科学研究意义极大,是开展黄土地震滑坡研究的天然试验场。



**Figure 1.** The distribution picture and real photos of loess seismic landslide induced by 1920 Haiyuan Earthquake

**图 1.** 1920 海原大地震诱发黄土滑坡野外调查点分布及滑坡实景图

黄土高原西北边缘地带的陇西地区是我国黄土地貌最为发育的地区，黄土梁、峁纵横交错，沟壑万千。区内沉积于晚更新世的马兰黄土“地毯式”披覆于下伏第三系红泥岩形成的基座地形之上，形成了特有的斜坡地层结构。马兰黄土孔隙大、胶结弱、透水性强，特殊的微观结构性质使其具有强烈的水敏性和动力易损性，降雨通过上覆黄土大孔隙下渗至黄土泥岩接触面形成软弱带，中、强地震作用下极易发育多发性、群发性黄土滑坡。

陇西地区地处我国南北地震带北段，构造活动强烈，公元 1500 年至今已发生中强震几十余起，地震诱发的黄土滑坡灾害历来是该地区最为严重的灾害之一，其中尤以海原大地震最为严重。海原大地震震级高达 8.5 级，强烈的地震动使其在西吉、静宁地区诱发了大量的黄土地震滑坡，造成了惨重的人员伤亡和生态破坏。本文通过大量总结前人研究成果，对海原大地震研究历程、黄土的工程特性及海原大地震诱发黄土滑坡的分布特征、影响因素及发育机理进行详细论述。希望通过本文的研究工作，期以对黄土地震滑坡的研究及陇西地区的工程建设能有一定的参考意义。

## 2. 黄土地震滑坡分类及分布特征

黄土滑坡的类型直接影响着其滑动及复活特征、变形破化方式及其致灾的范围。深入、详细的开展对黄土滑坡分类的研究有助于我们快速评估滑坡灾害和正确选择防治对策及措施。

乔平定(1990)对黄土滑坡进行了较为详细的划分：按滑体厚度分为：巨厚层滑坡( $H > 50$  m)，厚层滑坡( $H = 20 \sim 50$  m)，中层滑坡( $H = 6 \sim 20$  m)，浅层滑坡( $H < 6$  m)；按滑坡产生时代分为：古滑坡，老滑坡，新滑坡，新生滑坡；按照力源分为：推动式滑坡，牵引式滑坡；按剪出口与坡脚的关系分为：坡基滑坡，坡体滑坡；按诱发因素分为：自然因素滑坡和人为因素滑坡[3]。吴玮江(2002)按滑体岩土组成和滑面发育位置，将黄土滑坡划分为：黄土层内滑坡，黄土接触面滑坡，黄土-泥岩顺层滑坡和黄土-泥岩切层滑坡四种基本类型，并对这四种滑坡类型的基本规律进行总结。得出了黄土接触面滑坡、黄土-泥岩顺层滑坡的滑速低、滑距短、滑体稳定性差及复活性强；黄土层内滑坡、黄土-泥岩切层滑坡的滑速高、滑距长、滑体稳定性高，但后壁不稳定，易再次滑动的研究结论[4]。李同录(2007)按滑坡运动方式将其分成：错落式滑坡，高速远程滑坡，低速缓动滑坡和滑坡泥流四种类型[5]。

地震诱发黄土滑坡类型的研究对评价黄土边坡的地震稳定性有着重要的意义。地震诱发黄土滑坡类型多样复杂，张振中等(1999)通过对海原大地震诱发的黄土滑坡的现场调查研究，将其分为：黄土震陷型，黄土液化型和地震诱发型，其中地震诱发型又分为同震失稳型和震后失稳型[6]。陈永明等(2005, 2006)通过对大量黄土地震滑坡的统计分析，根据其滑面的发育位置将黄土滑坡分为：黄土层内滑坡，黄土-基岩顺层滑坡和黄土基岩切层滑坡；按滑体的大小分为：特大型，大型，中型和小型[7] [8]。袁丽霞(2005)通过对海原大地震诱发黄土滑坡的研究，将其分为：低角度、高速、远程滑坡和陡坡、短程滑坡两种类型[9]。邓龙胜(2010)通过对海原大地震诱发黄土滑坡破坏特征的详细调查分析，将强震作用下的黄土滑坡分为：振动-崩塌型，振动液化-流动型，震后蠕变型和振动软化-剪切破坏型四种类型[10]。

黄土滑坡的分布是区域环境地质条件与诸多触发因素综合作用的结果，总结已有滑坡的分布规律，对研究滑坡机理和滑坡灾害的预防有着重要的意义。邵顺妹等(1994)对在研究海原地区地展滑坡和重力滑坡形成条件和特点的基础上，首次采用多因素模糊数学综合评判方法对海原地区的滑坡空间分布特征进行了探讨和预测[11]。Zhang 等(1995)对海原地震滑坡进行了详细的调查，指出海原地震滑坡存在三个密集分布区，总面积约  $4000 \text{ km}^2$ ，并总结出海原地震滑坡具有含水量低、坡度缓、滑动速度快等特点[12]。邹谨敞等(1996)对据野外调查和航片判读资料分析了海原地区滑坡形成的基本条件，海原地区形成的滑坡分布面积广，其中有三处滑坡相对集中区域，并指出海原大地震诱发黄土滑坡具有群发性的特点[13]。单鹏飞(1996)在分析海原地震诱发的区域滑坡呈带状或团块状密集独特分布[14]。陈永明等(2005)对海原地

震滑坡进行了调查研究,指出海原地震滑坡存在三个集中分布区,分别为海原县南红羊乡、西静地区及通渭地区[7]。Dexuan Zhang (2007)对海原大地震诱发黄土地震滑坡的分布特征进行了总结概述并对西吉县党家岔滑坡开展了详细的实验、数值模拟研究[15]。尚慧等(2012)对海原大地震诱发黄土滑坡分布特征及分布规律进行了统计研究,得出滑坡大部分发育于黄土丘陵地区,群发性特点突出,且其分布在很大程度上受地震断层的影响[16]。邓龙胜等(2013)通过对 105 个点 200 余个滑坡的研究,认为西吉、海原、固原地区黄土地震滑坡具有集中发育、扎堆群发等特点,且易发生在坡高较低、坡度较缓、山梁单薄、地貌破碎的斜坡地带,并具有方向性和运动液化的特点[17]。李为乐等(2015)基于 Google Earth 的影像遥感技术获取数据并利用 Arcgis 处理得出地震滑坡分布与震中距离、地震烈度、断层距离、坡度、高程、斜坡高度、坡面七个方面的拟合关系,得出了其分布规律[18]。笔者等(2016)通过遥感解译对西吉地区黄土地震滑坡的分布规律进行了研究,得出区内滑坡主要分布于主干河流的南岸,沟谷内对生发育特征明显,且在黄土塬、微盆地中呈明显的汇聚式、群发性特征[19]。滑坡的类型决定着其变形破坏的方式,控制着其致灾的范围,是评估和防治滑坡灾害的基础。黄土滑坡的分布是区域环境地质条件与诸多触发因素综合作用的结果,总结已有滑坡的分布规律,研究滑坡的分布与地层岩性、地形地貌、地质构造、水文地质条件及地震的关系,对研究滑坡机理和滑坡灾害的预防有着重要的意义。

目前针对黄土滑坡、黄土地震滑坡的分类的研究已较为成熟,主要从滑动面发育位置、滑体厚度、体积、发生时间、运动方式及发育机理等方面对其进行分类。笔者在对西海固、静宁地区黄土地震滑坡调查的基础上,将黄土地震滑坡按其滑动面发育位置可分为黄土层内滑坡、黄土泥岩接触面滑坡及黄土泥岩切层滑坡三类;按区内地震滑坡破坏机理可分为振动拉裂-剪切破坏、震陷软化-剪切滑动破坏、振动液化-流滑破坏及震陷软化剪切-振动液化复合滑移破坏四类;按滑坡发育平面形态可分为圈椅状、不规则、矩形、长条形、马蹄形及三角形等;按区内滑坡剖面形态将其分为凹型、凸型及直线型三类。总结现有研究其成果,结合野外实际调查资料总结出海原大地震诱发黄土滑坡的分布特征主要有:①海原大地震诱发黄土滑坡主要存在三个集中分布区,分别为海原县南的李俊乡一带、西吉及静宁北部地区和通渭地区;②分布区内梁、塬地区滑坡具有群发、扎堆发育的特征;③海原大地震诱发黄土滑坡大部分具有陡后壁、缓滑体、低角度、高速远程滑移等特点(如图 2~图 4 所示)。



**Figure 2.** Landslide in Shengjiuzui, Xiji County  
**图 2.** 西吉县沈家嘴滑坡群



**Figure 3.** Landslide in Hongtuchuan, Xiji County

**图 3.** 西吉县红土川滑坡



**Figure 4.** Landslide in Zhenhu Township, Xiji County

**图 4.** 西吉县震湖乡滑坡

### 3. 影响因素及机理研究

研究滑坡的影响因素及发育机理对滑坡的稳定性评价及治理等有着重要的意义。单鹏飞(1996)在分析海原地震诱发的区域滑坡呈带状或团块状密集独特分布及其严重灾害特征的基础上,认为滑坡地形变的分布规律不仅受地震烈度的影响,还受黄土特性、地层结构、地貌过程和地震活动等多因素的影响。他认为控制西吉地区滑坡独特分布的地貌结构和空间组配关系,是造成当地滑坡灾害严重并与其它烈度区显著差别的主因之一[10]。袁丽霞(2005)对西吉县境内的滑坡进行了详细研究,认为在西吉县境内分布的大量滑坡是受该区域特殊的地形地貌、区域地质构造、应力关系、土质特征、震前宏观水异常等因素控制[9]。张立荣(2011)采用基础理论、现场式样和数值模拟相结合的方法,探讨了海原大地震等历史地震

诱发黄土滑坡的动力学机理, 结果表明水敏性和地震易损性是形成黄土相关灾害的主因, 并利用爆破试验模拟了黄土高边坡的动力响应[20]。邓龙胜等(2013)在对西吉县西南部黄土地震滑坡密集发育的解释上, 认为该区处于海原地震地壳破裂带的几何投影中心, 并受该区岩土分布特征、地貌特征, 以及所遭受地震波频谱特征控制[17]。彭政奎等(2013)通过对IX度烈度带内滑坡灾害密集的静宁县进行详细调查, 对所得数据进行统计分析得出了滑坡数量与原始坡度、背坡效应、坡体相对高度等要素之间的关系[21]。叶铃(2013)认为地形地貌、地层岩性、土层厚度、场地地震效应和地下水是影响海原地震诱发黄土滑坡分布的关键因素[22]。王甬等(2013)认为黄土地震滑坡主要受地震烈度、比高、坡高坡脚、地层岩性的影响[23]。刘维等(2014)人为滑坡的原始坡高、原始坡角、原始坡长等因素影响着滑坡的滑动速率及距离[24]。

在国外, Terzaghi (1948), Seed (1968), Lade (1992), 等提出了滑动液化的观点, 认为滑体在剧烈滑动时的振动力会引起液化[25] [26] [27]。Hutchinson (1971)提出“不排水加载效应”为流动型滑坡的滑动机制[28]。Sassa (1984)基于现场及室内滑坡模拟实验, 提出了“结构破坏 - 空压上升 - 液化”的土质滑坡破坏机理[29]。汪发武(2001)指出土粒子即土颗粒破碎具有导致超孔隙水压力的产生和减缓超孔隙水压力消散的双重作用, 是高速远程滑坡的一种重要机制[30]。在国内, 王家鼎等(2001)提出地震诱发高速黄土滑坡的机理是黄土体解体、斜抛、粉尘化效应和高速运移[31]。王明轩(2010)通过对具体对西吉县喜家湾滑坡的研究, 提出了黄土震陷型、黄土液化型、地震力诱发型三种滑坡机理类型[32]。张茂省等(2011)认为干黄土在地震波作用下形成了往复作用的超孔隙气压和负孔隙气压, 由于急剧变化的气压差在颗粒周围形成高速气流, 从而使黄土结构从内部彻底解体, 形成散粒, 散粒悬浮于气流中, 即使在很平缓的斜坡上也会发生流动, 随着地震波持续作用产生远距离滑移[33]。张晓超、王谦、徐敏、郭浪等(2014, 2014, 2014, 2013)通过对固原石碑塬黄土液化滑坡的实验、数值模拟等研究, 从场地条件及黄土动力特征等方面论述了石碑塬滑坡的形成机制[34] [35] [36] [37]。张泽林等(2016)通过离心机振动台试验模拟黄土 - 泥岩边坡动力响应及破坏特征, 在满足相似律的条件下, 通过输入不同振幅的水平向和垂向地震波, 系统地研究模型边坡的地震动力响应特性, 结果表明边坡关键点位的动力响应水平向大于垂向, 呈非线性, 并表现为趋表效应、高程效应和岩性效应。发现其破坏形式一般表现为: 坡肩形成拉张裂隙, 逐渐扩张, 坡肩产生向临空面方向的位移, 坡体中上部的黄土覆盖层隆起, 部分土体振松滑落堆积在坡脚[38]。研究黄土地震滑坡发生机理对滑坡的稳定性评价及治理等有着重要的意义。目前对黄土滑坡机理全面、系统的研究还不够完善。因此, 对黄土地震滑坡机理的研究仍是黄土研究的重要课题。

海原大地震诱发黄土滑坡发育机理的研究目前主要有液化说和气化说两种, 且绝大部分针对具体或特殊滑坡进行研究。笔者在野外详细观测多组滑坡滑动面发育形态及滑坡发育、分布的基础上, 结合前人研究成果, 根据滑坡破坏方式, 初步提出了振动拉裂 - 剪切滑动破坏、震陷软化 - 剪切滑动破坏、振动液化 - 流滑破坏和震陷软化剪切 - 振动液化复合滑移破坏四类黄土地震滑坡发育机理。

#### 4. 展望

陇西由于特殊的自然条件, 历来都是落后和贫穷地区。“一带一路”战略的实施和“两个一百年”目标的实现, 都将在该地区开展大规模的重大工程和城镇化建设。在建设中, 黄土灾害特别是南北地震带高烈度地区内的黄土滑坡灾害是不可回避的问题。本文提出围绕这一问题开展如下的研究工作。

- (1) 研究黄土地区地震作用下灾害风险评估的技术和方法。
- (2) 研究黄土滑坡的成因和影响因素, 针对黄土的特点, 研究和发发展黄土滑坡动力稳定性的评价方法。
- (3) 开展黄土地区地震滑坡的详细野外调查, 收集、积累详细的现场资料, 为黄土滑坡的深入研究提供基础资料。

## 5. 结语

黄土孕育了灿烂的中华文明, 养育了勤劳的中华儿女。然而, 黄土地震滑坡灾害给我国陇西地区的居民带来了重大的灾难, 减轻黄土地震滑坡灾害是我们永恒的课题。黄土地震滑坡灾害的成因十分复杂, 但黄土的水敏性和动力易损性是黄土灾害形成的根本原因。尽管我们在黄土地震滑坡灾害研究方面取得了丰富的成果, 这些成果也为减轻灾害做出了突出的贡献, 但是这一领域还有很多问题需要深入研究, 特别是黄土地震滑坡的现场调查应进一步加强。减轻黄土地区黄土地震滑坡灾害是保护“扶贫”成果的需要, 深入开展这一领域的研究对促进黄土地区的经济建设, 提高黄土科学研究水平有重要的意义。

## 基金项目

宁夏自然科学基金项目(2021AAC03486)。

## 参考文献

- [1] 国家地震局兰州地震研究所, 宁夏地震局. 1920年海原大地震[M]. 北京: 地震出版社, 1980: 1-5.
- [2] 宁夏回族自治区地震局, 中共海原县委, 海原县人民政府. 海原大地震·1920 [M]. 银川: 黄河出版传媒集团阳光出版社, 2010: 37-48.
- [3] 乔平定, 李增均. 黄土地区工程地质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [4] 吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 36-40.
- [5] 李同录, 龙建辉, 李新生. 黄土滑坡发育类型及其空间预测方法[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 500-506.
- [6] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [7] 陈永明, 石玉成. 中国西北黄土地区地震滑坡基本特征[J]. 地震研究, 2006, 29(3): 276-280.
- [8] 陈永明, 石玉成, 刘红玫, 卢育霞. 黄土地区地震滑坡的分布特征及其影响因素分析[J]. 中国地震, 2005, 21(2): 235-243.
- [9] 袁丽霞. 宁夏海原地震诱发黄土滑坡的形成机制研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2005.
- [10] 邓龙胜. 强震作用下黄土边坡的动力响应机制和动力稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [11] 邵顺妹, 邹敏. 古浪-海原地区滑坡分布规律的模糊综合评判[J]. 地震学刊, 1994(1): 1-6, 78.
- [12] Zhang, D. and Sassa, T.A. (1995) The Motion Characteristics of Loess Landslides Induced by Haiyuan Earthquake in Ningxia Province, China. *Journal of the Japan Landslide Society*, **32**, 12-17.
- [13] 邹谨敞, 邵顺妹. 海原地震滑坡发其分布特征探讨[J]. 内陆地震, 1996(1): 1-6.
- [14] 单鹏飞. 宁夏西吉地区滑坡灾害地貌的成因分析[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 535-542.
- [15] De, X.Z. and Gong, H.W. (2007) Study of the 1920 Haiyuan Earthquake-Induced Landslides in Loess. *Engineering Geology*, **94**, 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.07.007>
- [16] 尚慧, 倪万魁, 刘海松. 宁夏回族自治区西吉县地震诱发型黄土滑坡发育特征与分布规律[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 28-31.
- [17] 邓龙胜, 范文. 宁夏海原 8.5 级地震诱发黄土滑坡的变形破坏特征及发育机理[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 30-37.
- [18] 李为乐, 黄润秋, 裴向军, 张晓超, 张远明. 基于 Google Earth 的 1920 年海原 8.5 级大地震地质灾害研究[J]. 灾害学, 2015(2): 26-31.
- [19] 杨顺, 薄景山, 彭达. 基于遥感解译的西吉县黄土地震滑坡分布特征研究[C]//中国地质学会. 第十届全国工程地质大会论文集. 中国地质学会工程地质专业委员会: 《工程地质学报》编辑部, 2016: 687-693.
- [20] 张立荣. 强震作用下黄土边坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2011.
- [21] 彭政奎, 裴向军. 海原地震Ⅸ度带内滑坡与地质地貌因素之间的相关关系[J]. 成都大学学报(自然版), 2013, 32(4): 419-422.
- [22] 叶铃. 海原大地震诱发黄土滑坡分布规律及运动特征研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [23] 王鼎, 王兰民. 河谷地区黄土地震滑坡特征与影响因素分析. 河谷地区黄土地震滑坡特征与影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 434-438.

- [24] 刘维, 裴向军, 蒲丹. 海原地震诱发黄土滑坡的运动影响因素及滑距研究[J]. 路基工程, 2014(2): 40-43.
- [25] Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948) Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley, New York.
- [26] Seed, H.B. (1968) Landslides during Earthquakes Due to Soil Liquefaction. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **94**, 1053-1122.
- [27] Lade, P.V. (1992) Static Instability and Liquefaction of Loose Fine Sandy Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, **118**, 51-71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:1\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:1(51))
- [28] Hutch in-son, J.N. and Bhandari, R.K. (1971) Untrained Loading a Fundamental Mechanism of Mudslide and Other Mass Movements. *Geotechnique*, **21**, 353-358. <https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.4.353>
- [29] Sassa, K. (1984) The Mechanism Starting Liquefied Landslides and Debris Flows. *4th International Symposium Landslide*, Toronto, 16-21 September 1984, 349-354.
- [30] 汪发武. 高速滑坡形成机制: 土粒子破碎导致孔隙水压力的产生[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(1): 64-69.
- [31] 王家鼎, 白铭学, 肖树芳. 强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 445-449.
- [32] 王明轩. 喜家湾滑坡形成机理及稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [33] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.
- [34] 张晓超, 黄润秋, 许模, 裴向军, 韩祥森, 宋丽娟, 等. 石碑塬滑坡黄土液化特征及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2014(3): 801-810.
- [35] 王谦, 王峻, 王兰民, 王平, 钟秀梅. 石碑塬饱和黄土地震液化机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(z2): 4168-4173.
- [36] 徐敏, 裴向军, 张晓超. 强震触发石碑塬滑坡黄土动力特性[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014(4): 492-498.
- [37] 郭浪, 裴向军. 石碑塬滑坡成因机制及数值模拟初步分析[J]. 长春工程学院院报(自然科学版), 2013, 14(1): 93-95, 128.
- [38] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 唐辉明, 梁昌玉, 辛鹏. 地震作用下黄土-泥岩边坡动力响应及破坏特征离心机振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1844-1853.