

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.007

# 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展

孙萍萍,张茂省,贾俊,程秀娟,朱立峰\*,薛强,王佳运

(自然资源部黄土地质灾害重点实验室,中国地质调查局西安地质调查中心,陕西 西安 710054)

**摘要:**西部黄土地区特殊的自然地理环境和地质构造背景,加之黄土特殊的工程特性,使得区内滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害多发、频发,举世瞩目的黄土高原更是全国的地质灾害高发区和防治重点区。自 20 世纪 50 年代,区内陆续开展了与地质灾害相关的调查评价工作,特别是通过“十二五”和“十三五”期间的工作,基本查明了区内地质灾害的成灾规律,探索了黄土地质灾害早期识别、调查技术方法、监测预警、风险评估等关键技术,搭建了自然资源部黄土地质灾害重点实验室和野外科学观测站等平台,有效支撑了西北各省区地质灾害综合防治体系的建立。笔者在回顾以往工作成果的基础上,结合近年来受极端气候和人类工程活动影响,分析了西部黄土区地质灾害防治面临的新形势,提出了基于强化地质灾害风险调查、优化和完善监测技术、构建隐患点与风险区双管控的风险管控模式,进一步整体提升西北黄土地区地质灾害防控水平的建议。

**关键词:**地质灾害;防灾减灾;监测预警;黄土高原;西北地区

**中图分类号:**P694 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2022)03-0096-12

## Geo-hazards Research and Investigation in the Loess Regions of Western China

SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIA Jun, CHENG Xiujuan,  
ZHU Lifeng\*, XUE Qiang, WANG Jiayun

(Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an Center of China  
Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The geo-hazards such as slide, collapse and mud flow occur frequently due to the natural geographical environment, geological structure in western China and the special engineering characteristics of loess. The loess Plateau, which attracts worldwide attention, is a high susceptibility area for geo-hazards and a key area for its mitigation in China. Since the 1950s, the landslides investigation and evaluation have been conducted. In particular, through the relevant work during the 12th Five-Year Plan and the 13th five-year Plan period, the regularity of geo-hazards in the area has been basically found out, the key technologies such as early recognition, field investigation, monitoring and early warning, and risk assessment of loess geo-hazards has been explored,

收稿日期:2022-01-17;修回日期:2022-05-20;网络发表日期:2022-08-15;责任编辑:吕鹏瑞

基金项目:国家重点研发计划项目“黄土滑坡失稳机理、防控方法研究与防治示范”(2018YFC1504700),中国地质调查局项目“黄河中游生态地质调查”(DD20211398)和“黄河中上游生态地质调查”(DDDD20221774)联合资助。

作者简介:孙萍萍(1983-),女,博士,高级工程师,主要从事黄土工程特性与黄土地质灾害研究。E-mail:sunpingping203@gmail.com。

\* 通讯作者:朱立峰(1973-),男,高级工程师,主要从事黄土地区水工环研究。E-mail:397871699@qq.com。

the key Laboratory of Loess geo-hazards and field scientific observation stations of the Ministry of Natural Resources has been built, which effectively supports the establishment of comprehensive geo-hazards mitigation system in the Northwest China. On the basis of reviewing the previous work achievements, combined with the influence of extreme climate changes and human engineering activities in recent years, this paper analyzes the new situation of loess geo-hazards prevention in the western loess regions. In order to further improve the loess geo-hazards mitigation of western China, several suggestions are put forward, such as strengthen the geo-hazards risk investigation, improve the monitoring technologies targeted to loess geo-hazards, construct the geo-hazards risk management considering both the potential loess geo-hazards and the geo-hazards susceptibility areas.

**Keywords:** geo-hazards; geo-hazards prevention and reduction; monitoring and early warning; loess plateau; Northwest China

中国是世界上黄土最为发育的国家,主要分布于陕西、甘肃、宁夏、青海、山西、河南、新疆 7 省区 34 个地级市,黄土连续分布面积达 44 万 km<sup>2</sup>,是中国地质灾害高易发区之一(图 1)(Derbyshire et al., 1994; 孙建中, 2005; 徐张建, 2007; Sun et al., 2012)。据统计,不到国土面积 5% 的黄土地区在册地质灾害隐患点 3.9 万余处,占全国 33 万余处在册地质灾害隐患点的 12%,其中 95% 以上为滑坡崩塌

(张茂省等, 2015)。

黄土多分布于干旱-半干旱地区,其特殊的沉积和赋存环境使之呈现出典型的非饱和土工程特性,且表现为对水极为敏感(张茂省等, 2016; Feng et al., 2021),这也使得黄土高原成为世界上水土流失最为严重的地区之一,在构造作用、地面流水地质作用以及地下水地质作用等内外动力地质作用下,塑造了塬、梁、峁等地形破碎和沟壑纵横的黄土地貌景观,

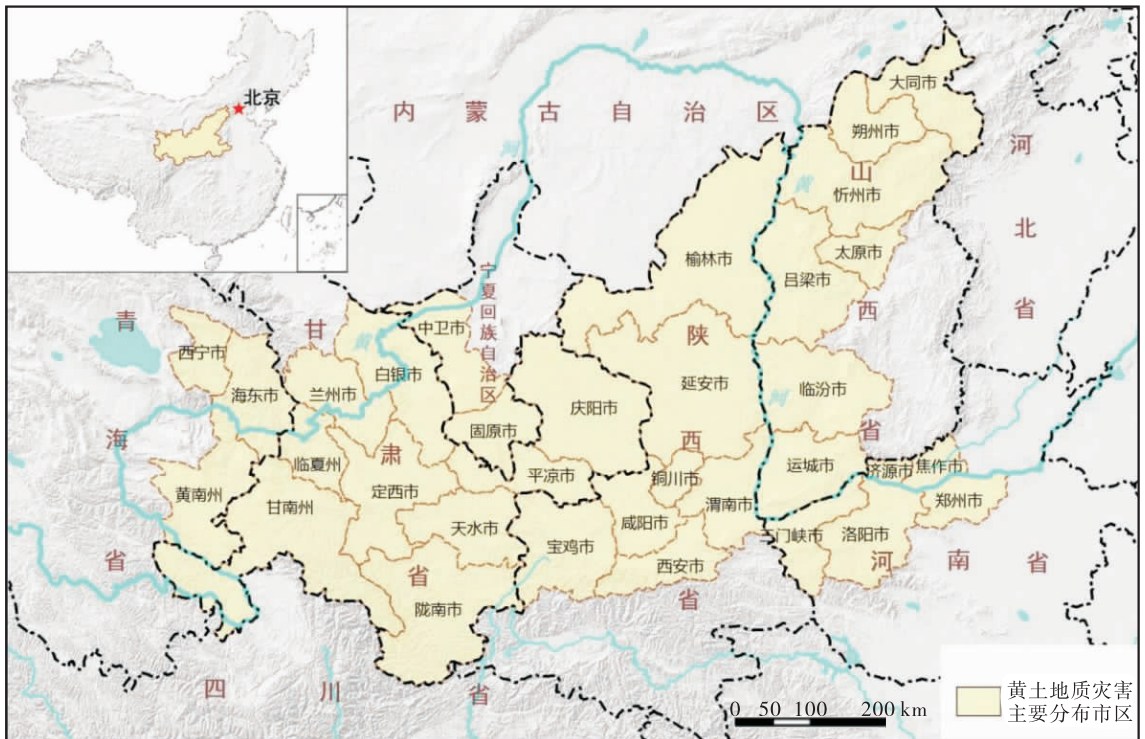


图 1 西北黄土地质灾害主要分布市区图

Fig. 1 The mainly cities for loess geo-hazards distributed in Northwest China

成为中国地质灾害最为发育的地区之一(彭建兵等, 2014, 2020)。西部黄土分布区的地质灾害多集中发生于每年6~10月的雨季,水是黄土滑坡最积极的诱发因素之一(张茂省等, 2011; 黄玉华等, 2014; 彭建兵等, 2019)。降雨入渗过程中,随着土体含水率升高,黄土的吸应力和有效应力降低,渗透性增强,冻融期反复冻结融化循环过程直接导致黄土强度降低,工程扰动造成斜坡应力集中并急剧增大,原有的应力平衡状态遭到破坏,都是诱发黄土崩塌、滑坡等地质灾害的直接因素(张茂省等, 2013; 曾磊, 2018; 李同录等, 2018)。

中国西部黄土地区的地质灾害调查工作起步较早,20世纪50年代开展的以水利工程和铁道工程为主的工程地质勘察工作中均涉及到地质灾害;20世纪80年代以来,以省区为单元开展了以地质灾害为主的1:50万区域环境地质调查工作,基本查清了区内的环境地质背景,人类工程活动与地质环境相互作用和影响。1999~2005年,以县(市)为单元开展了1:10万精度的地质灾害调查与区划工作。2005~2012年,在西北各省区以县(市)为单元开展了1:5万精度的地质灾害调查工作,建立起了县、乡镇、村三级联动的群测群防体系。2013年至今,开展了以流域为单元的地质灾害调查,1:1万重要城镇地质灾害调查工作,系统调查了地质灾害的数量、类型及分布。区内地质灾害的类型包括滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降、地面塌陷等,其主要分布黄土高原、天山以北伊犁地区等(刘文红, 2016; 孙萍萍等, 2019a)。

黄土高原地区通过1:5万地质灾害调查,共查明重点地区地质灾害隐患点14 161个,其中重大隐患点1 731个,新增隐患点5 491个,撤销隐患点625个,并针对地质灾害隐患点逐一提出了相应的防治对策,并据此采取了相应的防治措施。建立的地质灾害数据库和地质灾害信息管理系统,在县、市级地方政府部门的地质灾害日常管理及预警预报工作中发挥了重要作用。在“5.12”汶川地震、“4.14”玉树地震、“7.3”暴雨灾害、“8.12”山阳滑坡等10余起地质灾害应急救援中发挥了重要的技术指导作用。

在上述工作的基础上,围绕西部黄土区地质灾害防治工作的重大需求,通过多学科交叉融合、新技术新方法拓展等方式,在地质灾害高精度调查评价、

隐患早期识别、监测预警、风险管控、防治技术研发与示范方面取得了系列进展与成果。

## 1 黄土水敏工程特性与黄土地质灾害

### 1.1 黄土水敏工程特性

黄土因对水极为敏感,具有结构疏松、大孔隙、垂直节理发育等特点,遇水后易发生崩解、湿陷、液化、流变等系列形变,在降雨、冻融、工程扰动等外部诱发因素作用下极易产生整体形变。

依据黄土高原黄土沉积的区域特征,结合已有的典型黄土剖面研究成果,选取横跨黄土高原东西、南北2条区域性剖面上的不同沉积年代的黄土为研究对象(包括陕北洛川剖面、关中白鹿原剖面、榆林绥德剖面、陕西泾阳南塬剖面、陇西黑方台地区, S1-S14和L1-L15的不同土层样品),依托瞬态脱湿与吸湿试验装置(Transient Water Release and Imbibition Method,简称TRIM)(Lu et al., 2006),开展黄土高原不同区域和不同沉积年代黄土的非饱和特性测试,建立了黄土高原黄土的土水特征、渗透特征、吸应力特征曲线数据库。试验结果表明:①黏土矿物含量尤其是伊利石和蒙脱石混层矿物含量(I/S)和孔隙结构特征是影响非饱和土-水特征曲线的重要参数,其中I/S与非饱和黄土的残余含水量呈现正相关关系(图2)(孙萍萍等, 2019b);孔隙比与进气值参数( $a$ )存在负相关关系,与孔径分布参数( $n$ )存在正相关关系。②黄土对水的敏感程度随其沉积年代和在黄土高原沉积位置的不同,呈现出规律性的变化。在空间上,从西向东、由北向南,黄土的水敏性减弱;时间上,沉积年代由老到新,黄土的水敏性增强。③含水量增加过程中,吸应力变化引起的介质宏观变形能力是黄土水敏性的力学本质(孙萍萍等, 2019c)。

### 1.2 水致黄土滑坡形成机理

由于黄土强烈的水敏性,使得水成为黄土滑坡最为积极的诱发因素。非饱和带黄土含水率的升高导致土体有效应力降低,地下水位的抬升导致饱和带黄土抗剪强度减弱,这些都可能引起黄土斜坡的变形破坏(Wen et al., 2014; Garakani et al., 2015)。通过在黄土地区的研究,揭示了6种典型水致黄土地质灾害演化模式与诱发机理,更新了原有认识,为黄土地质灾害精准防控提供了科学依据。

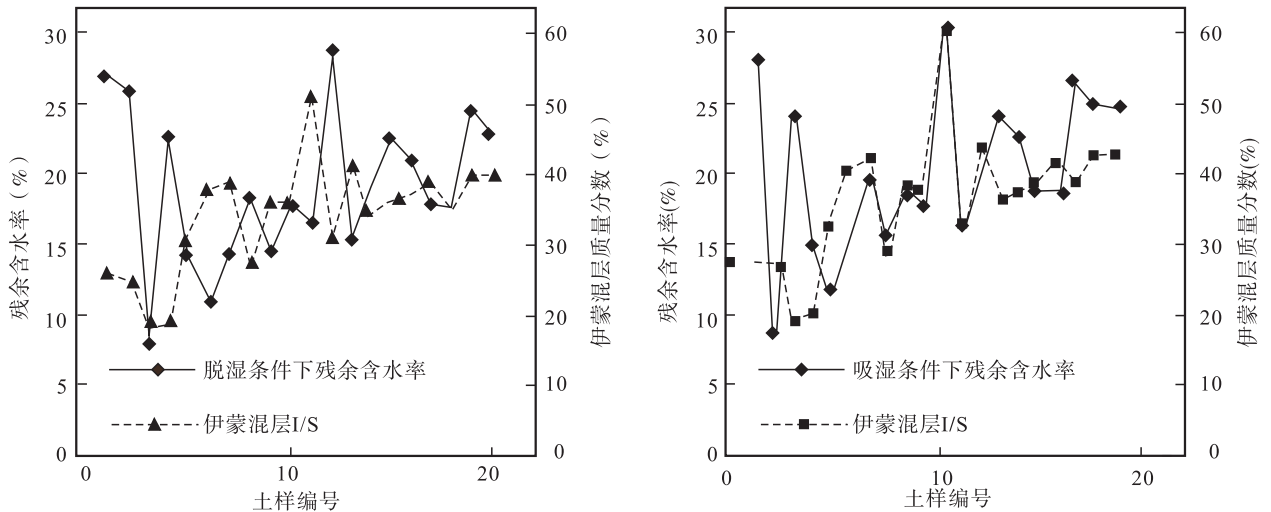


图2 残余含水量与伊利石和蒙脱石混层矿物(I/S)质量分数关系曲线图

Fig. 2 Changes of residual volumetric water content with I/S under both drying and wetting conditions

(1)均匀入渗-坡面泥流模式。该模式是降水均匀入渗导致黄土坡面泥流的演化模式,揭示了黄土无限斜坡在接受降水均匀入渗过程中,随着土体含水率不断升高,吸应力不断降低导致黄土斜坡浅表层整体滑脱破坏的力学机制。

(2)优势入渗-黄土滑坡模式。该模式是降水优势入渗导致黄土滑坡的演化模式,通过高密度电法、地质雷达、光纤、核磁共振等手段探测及多参数实时监测,实现了优势入渗通道的定量刻画,揭示了降水汇集—优势入渗—底部扩散的过程,从而导致黄土滑带土体含水率升高,吸应力降低,产生黄土滑坡。

(3)水库侧渗-黄土滑坡模式。该模式是水库蓄水—侧渗—黄土梁另一侧地下水位壅高一诱发黄土滑坡的演化模式,从库水位与潜水浸润面高度、斜坡失稳概率关系定量分析入手,揭示了水库蓄水在黄土梁另一侧诱发黄土滑坡的机理。

(4)强震破坏-黄土滑坡模式。该模式是黄土斜坡结构类型-边界条件-动力响应-强震破坏-黄土滑坡的演化模式,揭示了强震条件下滑坡发育类型、运动规律、破坏特征及其环境效应,建立了黄土高原斜坡强震条件下失稳判据及危害性评价方法。创新性的提出了饱和黄土液化后“剪切稀化”特征,指出饱和黄土液化后流滑体为典型的“剪切稀化”非牛顿流体。

(5)灌溉-黄土滑坡模式。该模式是灌溉引起地下水位上升导致黄土滑坡的演化模式,揭示了灌溉条件下地下水系统响应机制,定量刻画了灌区地下

水动力系统演化过程-水动力场与斜坡应力场耦合-斜坡变形-滑坡形成机理。

(6)冻融-黄土滑坡模式。该模式是基于地温-气温-含水量-吸应力-孔隙水压力的原位监测系统,证实了冻结滞水效应的存在,获取了冻结滞水引起的地下水位壅高的幅度和范围,揭示了冻融条件下地下水滞水效应及斜坡表层土体强度衰减效应,定量刻画了冻融作用的促滑机理,揭示了黑方台地区3月份滑坡高发的原因,该项成果入选中国地质调查百年“百项理论”。

### 1.3 黄土高原地质灾害发育分布

黄土高原地区通过1:5万地质灾害调查,共查明地质灾害隐患点14 161个,其中重大隐患点1 731个,新增隐患点5 491个,撤销隐患点625个(图3)。黄土地质灾害主要分布在陕西、甘肃、宁夏、青海、山西、河南等6省区33个地级市,地质灾害在区域、流域和具体的点上都呈现出一定的分布规律。

区域上,黄土高原第三纪构造盆地和第四纪构造隆起控制着地质灾害的类型和空间分布,不同构造单元控制了地质灾害的区域发育程度,经过各种作用的不同地层提供了灾害发育的物质基础;斜坡地质结构类型控制着斜坡变形破坏模式,同时影响黄土斜坡的稳定性(图4)。

流域上,沟谷演化的过程是黄土地层不断被侵蚀、切割的过程,沟谷侵蚀循环的发展阶段控制了地质灾害的类型、规模及危害程度。老年期河谷自然侵蚀扩张速度慢,自然滑坡较少,但由于河谷宽阔,

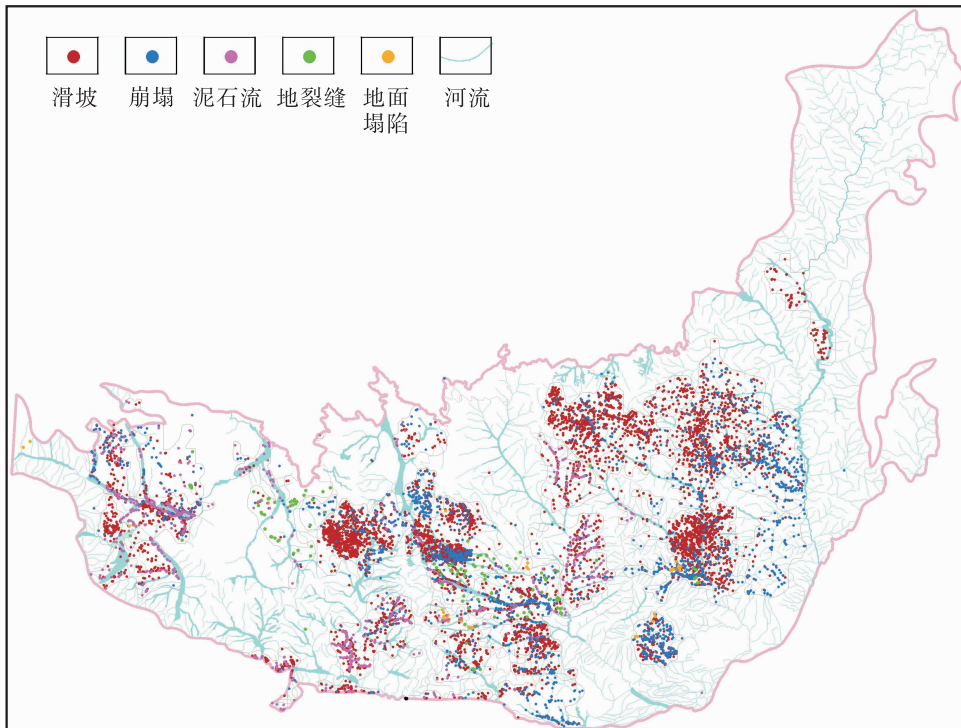


图3 黄土高原地质灾害分布图

Fig. 3 Distribution of landslides at the Loess Plateau

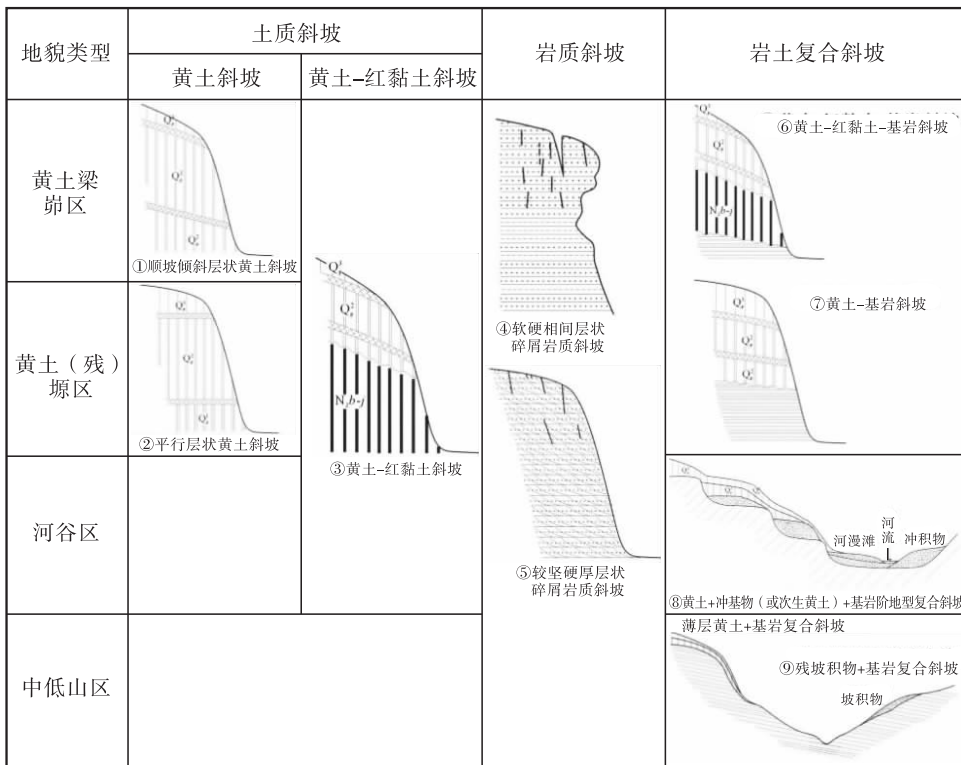


图4 黄土高原斜坡地质结构类型图

Fig. 4 Structure types for slopes with multiple sediments

强烈的人类工程活动触发的滑坡、崩塌最多,且危害严重;壮年期河谷垂直下切较缓,侧向侵蚀突出,谷坡坡度 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ,易发生变形失稳,灾害类型以滑坡为主,且灾点密度较大;幼年期沟谷是河谷发育的初

期,深度不一,垂直下切强烈,风化、卸荷裂隙发育,破坏以崩塌为主,威胁对象不多。

点上,坡型、坡度和坡高是斜坡形变破坏的控制因素,植被、坡向则是影响因素(图5)。

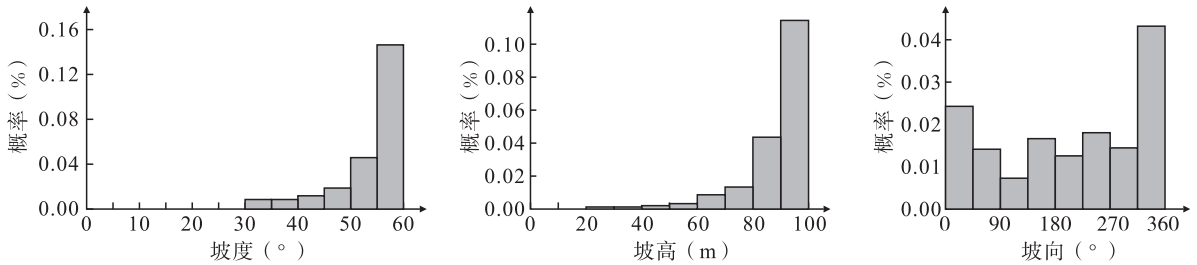


图5 坡度、坡高、坡向与黄土斜坡失稳概率图

Fig. 5 Relationship of slope gradient, slope height and slope direction with slope stability

## 2 地质灾害调查与防治技术

### 2.1 地质灾害调查技术

针对西北黄土高原区地质灾害特点,建立了统一的遥感图像处理标准和地质灾害解译标志,完成了重点地区的地质灾害遥感解译工作,开发了地质灾害遥感成果数据库,实现了海量遥感影像数据的管理和应用。以陕西省延安市宝塔区为试点,开展地质灾害详细调查示范,总结了一套以遥感调查为先导,以地面调查和灾点测绘为主要手段,辅以必要的钻探、物探和山地工程,采用点、线、面相结合,重点调查和一般调查相结合的方式开展调查的工作流程和技术方法体系,有效指导了全国地质灾害详细调查工作的全面开展(张茂省等,2011;薛强等,2021)。

### 2.2 地质灾害隐患识别技术

滑坡孕育与演化过程中伴随着大量的可观测信息,对这些信息进行有效监测和识别是实现灾害风险减缓的有效措施(许强等,2020)。基于地质判识的滑坡早期识别技术是最基础、最具普适性的技术方法,通过滑坡地貌特征、斜坡结构以及地质环境条件等要素来捕捉滑坡灾变征兆,进而实现滑坡有效识别。应用L波段ALOS-2卫星数据,采用D-InSAR(differential interferometric synthetic aperture Radar,简称DInSAR)技术开展了地质灾害动态调查与识别,获取区内地表形变信息,圈定地质灾害隐患斜坡段。采用贴面摄影测量技术获取高精度

三维地形数据,构建高精度三维实景模型,形成局部特征信息快速提取技术,该技术可有效开展主控结构面、临空条件和节理裂隙等精细化特征提取。在此基础上,研发了基于区域地表形变分析与单体变形特征捕捉相结合的地质灾害空地探测识别技术,构建了基于InSAR、贴近摄影测量等技术的地质灾害隐患早期识别技术框架(图6)。

### 2.3 地质灾害风险评价技术

地质灾害风险管理始于20世纪80年代末,20世纪90年代末开始流行。2005年在加拿大温哥华召开的滑坡灾害风险管理国际会议,对滑坡(含崩塌、泥石流)灾害风险管理的基本理论、方法、经验以及实例进行了研究讨论,代表了当时国际滑坡风险评价管理的最新进展(唐亚明,2012)。2006年,中国地质灾害风险调查工作开始起步。在自然资源部中国地质调查局的统一部署下,开展了地质灾害风险管理示范研究,将地质灾害调查与风险评价划分为小比例尺( $\leq 1:100\,000$ )、中比例尺( $1:25\,000\sim 1:100\,000$ )、大比例尺( $1:5\,000\sim 1:25\,000$ )和超大比例尺( $\geq 1:5\,000$ )4种类型。借鉴国外经验,在西北地区率先开展了宝鸡和延安地区地质灾害风险评估示范,在宝塔区对人员和财产分别进行了评价和区划,将全区划分为高风险、中风险和低风险3级;对区内重点地区1:1万崩滑流风险区划,综合危险性和危害后果,将区域划分为风险很高、风险高、风险中、风险低和风险很低5级。总结形成了一套不同比例尺的地质灾害风险评价与区划技术与流程,为区内地质灾害风险管理提供了依据。

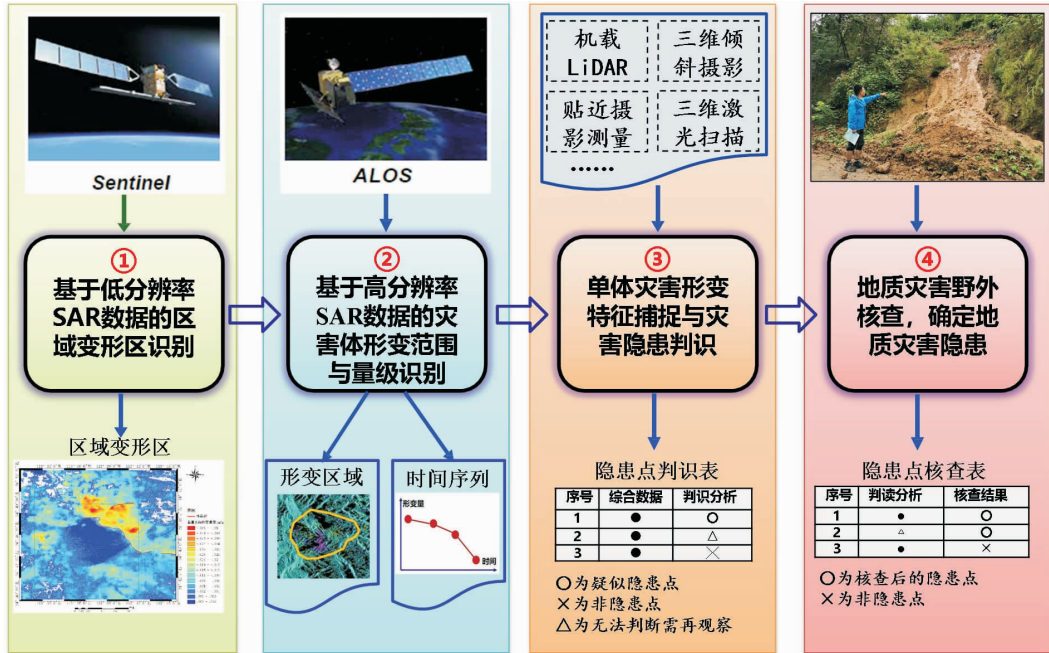


图 6 地质灾害隐患早期识别技术框架图

Fig. 6 Technical framework for early identification of geo-hazards

## 2.4 地质灾害监测技术

原国土资源部和中国气象局签订的《关于联合开展地质灾害气象预警预报工作协议》，标志着中国地质灾害气象预警预报工作正式启动，各省区、市、县相继开展各类地质灾害专业监测。西北地区的地质灾害监测工作于 2007 年开展，分别在陕西延安、宝鸡，甘肃黑方台等地开展了专业的地质灾害监测预警示范建设和技术方法研究，针对区内重大隐患点开展包括斜坡位移、斜坡土体含水量、孔隙水压力等专项监测及降雨量等气象监测；针对一般隐患点开展了包括简易裂缝、位移等监测，有效发挥了地质灾害预测和警示作用。在此基础上，完善了西北地区的地质灾害群测群防网络体系，以三维地理信息系统为基础，建设了地质灾害监测预警预报系统。2020 年以来，以陕南略阳、甘肃舟曲为示范，启动了西北地区地质灾害普适性监测，相继开展了陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆等地的普适性地质灾害监测工作。

在监测技术研发方面，结合黄土地区特点，通过对传统的电阻率层析成像技术测量设备和供电方式进行改进，实现了将其应用于野外进行长期监测，设备具有无人值守、数据自动测量和远程传输的特点（图 7）（孙萍萍等，2020）。依托自然资源部黄土地质灾害延安野外科学观测基地，应用该设备，建立

了一套集改进的电阻率层析成像和多种传感器为一体的监测网，原位获取了黄土斜坡电阻率与对应位置处含水率的长期动态监测数据。结合室内试验与原位监测数据进行综合分析，建立了黄土电阻率与含水率的对应关系。将基于电阻率监测反演得到的含水率与基于传感器监测的含水率进行对比，发现二者吻合较好，说明应用改进的电阻率层析成像测量技术对黄土斜坡水分入渗过程进行监测具有可行性和应用前景。可以应用改进的设备进行长期监测，动态捕捉斜坡水分入渗过程，为水致黄土滑坡区域预警预报精度的提升提供基础数据和技术支撑。

## 2.5 地质灾害工程治理技术

开展了大型物理模型试验，查明了黄土滑坡中微型桩和锚索抗滑桩的承载机理，揭示了黄土滑坡中微型桩和锚索抗滑桩的破坏模式及特征，建立与完善了新的微型桩、锚索抗滑桩设计计算理论，成果已纳入《滑坡防治技术指南》。

基于黄土渗透性能低、排水困难等难题，提出了基于混合井、平硐、虹吸等新型排水技术（图 8），并在甘肃黑方台、陕西延安、咸阳等地区的水致黄土地质灾害治理中得到了充分应用，排水效果显著，防灾减灾效果明显。

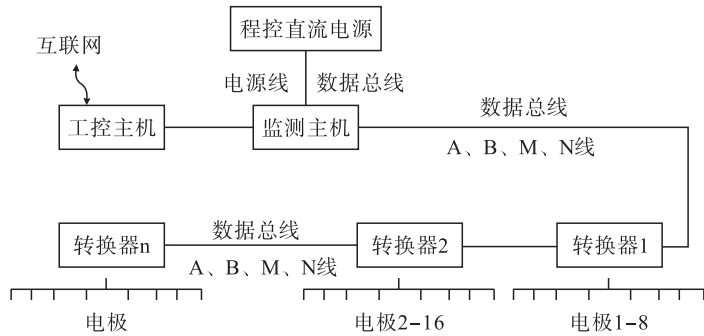


图 7 改进的电阻率层析成像监测装置图

Fig. 7 Instruments and its main components of the improved ERT

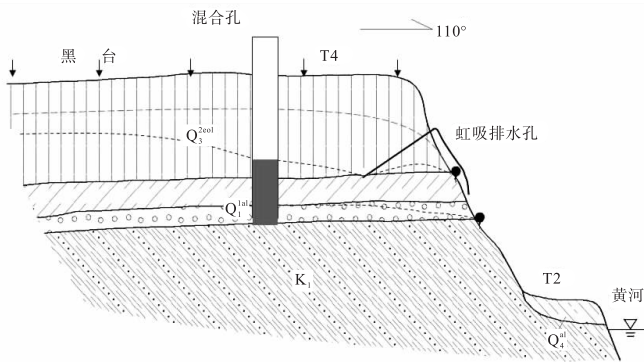


图 8 黄土斜坡地带水平虹吸排水的混合疏排水技术图

Fig. 8 Drainage technique of horizontal siphon drainage and mixed well drainage in the loess slope

### 3 地质灾害监测预警典型案例

#### 3.1 区域性地质灾害监测预警

在区域地质灾害监测预警方面,通过对 20 世纪 80 年代以来陕北黄土高原地区 25 个县近 30 年的已知发生时间的地质灾害临界降雨量进行了系统研究,以降雨为诱发因素进行了地质灾害危险性区划,初步建立了陕北黄土高原地区地质灾害气象预警模型。进一步结合黄土水敏工程特性,依托 Hydrus 软件中的 Slope Cube 模块,构建渗流-应力耦合的斜坡稳定性分析模型;根据 Lu 等(2012)提出的局部安全系数算法,计算和分析了在不同降雨条件下,不同坡度的凸型、凹型、直线型斜坡的含水率、吸应力和局部安全系数二维分布,分析了斜坡变形破坏的可能性,构建了基于斜坡变形破坏概率的降雨型浅层黄土滑坡预警模型。在此基础上,选取陕西省

延安市宝塔区的主城区约 214 km<sup>2</sup> 范围为研究区,在对研究区降雨特征、地貌几何参数、灾点数据进行提取和分析的基础上,以斜坡二维含水量分布为纽带,采用类比法,将不同几何形态的单体斜坡计算结果在区域上加以应用,并与“7.3 暴雨事件”中的实际灾点数据进行了对比(图 9),验证了该预警模型的精度。

#### 3.2 专业监测点预警实例

##### 3.2.1 甘肃黑方台地质灾害监测预警实例

甘肃省永靖县黑方台地区是黄河三峡(刘家峡、盐锅峡和八盘峡)库区移民的安置区,为解决移民区干旱缺水问题,1968 年实施了扬黄引水灌溉工程。长期大量引水灌溉和冻融作用导致黑方台周边滑坡频发,严重地威胁着群众生命和财产安全。2010~2012 年,西安地质调查中心与挪威岩土工程研究院(NGI)联合开展了黑方台地区地质灾害风险减缓国际合作研究,并与甘肃省地质环境监测院及永靖县国土局联合共建了黑方台黄土崩滑灾害野外科学观测基地。依托监测基地成果,系统揭示了灌溉水入渗机理及灌区地下水系统演化规律,查明了黄土工程地质特性的灌溉效应。结合大型离心模拟实验,揭示了灌溉诱发型黄土滑坡启动机理与运动过程,并在此基础上 2 次成功预报滑坡,避免了人员伤亡。

结合滑坡机理研究和变形监测结果,在黑方台陈家村滑坡发生前 10 天和 5 小时分别向永靖县国土资源局发布了短期预警和临滑预警。2015 年 1 月 29 日,提前 5 小时预报陈家村滑坡,避免了人员伤亡;2015 年 4 月 29 日,对罗家坡段滑坡提前预警,迅速撤离受滑坡威胁的 47 户居民和 3 家企业人员,成功避免人员伤亡 450 余人(图 10)。



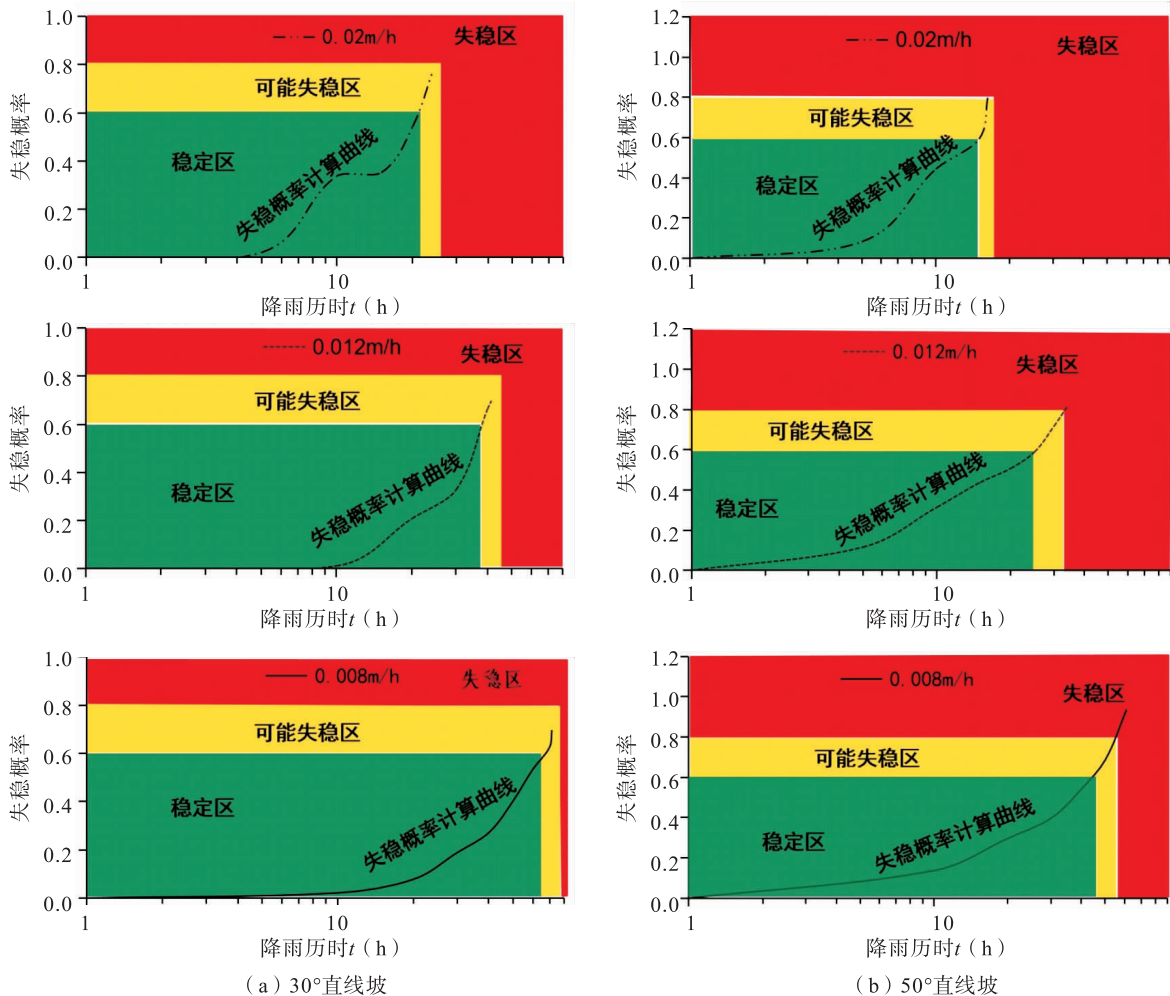


图9 基于斜坡失稳概率的黄土滑坡预测分级图

Fig. 9 Prediction classification of loess landslides based on slope instability probability

3.2.2 陕西延安淹土安滑坡监测预警实例

淹土安滑坡位于陕西省延安市甘泉县城关镇瓦窑沟,2013年7月延安地区发生极端强降雨,导致滑坡前部蠕动变形,滑坡体出现数条横向拉张裂缝,滑坡有复活迹象。为了减灾防灾和分析研究滑坡变形特征、变形力学机制,2013年10月16日开始对滑坡进行实时监测。通过对淹土安滑坡含水率与变形量进行分析,结果表明,在土壤含水率增大的时间段内,滑坡变形量也有增大的趋势;同时,在土体基质吸力减小的过程中,滑坡变形量在增大。因此,土壤含水率和基质吸力的改变对滑坡稳定性有着显著的影响。

基于原位含水量和变形数据,结合水致黄土地质灾害成灾机理,于2014年5月14日发现滑坡变形加剧,及时进行了预警预报,受威胁人员全部安全

撤离,撤离次日滑坡前部滑塌,方量约200 m<sup>3</sup>,有效避免了人员伤亡。根据监测结果,滑坡变形过程可分为初始变形、加速变形、变形破坏和减速变形4个阶段。降雨是滑坡变形失稳的主要诱发因素,坡脚开挖和冻融作用对滑坡变形失稳也有重要影响。

4 西北黄土地区地质灾害防治面临的新问题新挑战

近年来,受极端气候变化和人类工程活动影响,西北黄土地区地质灾害防治面临诸多新的形势。

(1)气候暖湿化导致雨线北移,极端降雨频发,汛期延长。21世纪以来,西北地区年均降水量增幅约9.6 mm/10a,2000年以来,陕北地区400 mm等降水量线向西北方向移动达40 km,大于400 mm



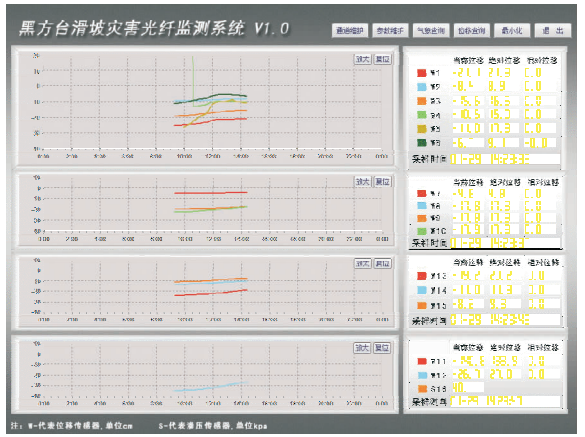
(a) 20150129陈家滑坡滑坡全貌



(b) 20150429罗家坡段滑坡全貌



(c) 滑动前10天短期预警数据



(d) 滑动前5小时临滑预警数据

图 10 陈家村滑坡预警数据图(2015年1月29日)

Fig. 10 The early warning data for Chenjia landslides at 29<sup>th</sup> January, 2015

的降雨区面积增大了 6.5%。2010 年后,降水量年代变差系数由 0.16 增大到 0.29,即干旱与洪涝交替更加明显。近 10 年,西北干旱区年内降水分布更加不均,6~9 月降雨量占全年降雨量的比例可达 80%以上。极端降雨强度增大,暴雨对降水的贡献由 15%增大到 20%,由 2.3 次/年增大到 4.1 次/年,强降雨频次逐步增加。陕北黄土地区在 2013 年、2017 年、2021 年高频次出现极端降雨,其中 2013 年 7 月连续降雨时长达 12 天,累计降水量达到 568 mm。同时,汛期呈延长趋势,2021 年共经历了 22 轮强降雨过程,最后一轮强降雨到 10 月 15 日结束,斜坡高含水率状态与冻融期接续,使得地质灾害防治形势更为复杂。

(2)小规模地质灾害致灾逐渐成为人员伤亡的主要成灾模式。随着地质灾害防治体系建设逐步

完善,中等以上规模的地质灾害造成人员伤亡水平显著下降。“十三五”期间,黄土地区发生小规模地质灾害数量占比为 81.0%,造成人员伤亡占比为 60.6%,相比“十二五”,分别上升了 12.9%和 21.2%。2021 年小规模地质灾害造成人员伤亡占总数的 57.1%,而在 2011 年该比例为 19.1%。

(3)低易发区在极端气候条件下发生大量地质灾害。近年来,城镇周边建设活动频繁,切坡建房、修路形成了大量的人工高陡边坡,地质灾害呈现向村镇发展的趋势,极端降雨下以往的低易发区也呈现灾害多发的趋势。甘肃天水娘娘坝地区以往为地质灾害低易发区,2013 年 7 月发生极端降雨,诱发浅层黄土滑坡 872 起,造成 33 人死亡,直接经济损失 39.6 亿元。

## 5 结论与展望

(1)西北地区地质环境条件脆弱,人类工程活动强度强烈,是中国地质灾害强烈发育的地区,在国家统一部署下,“十三五”期间西北地区地质灾害防治成效显著。然而,受近年来极端气候变化和人类工程活动影响,西北地区地质灾害防治面临诸多新的形势,诸如气候暖湿化导致雨线北移,极端降雨频发,汛期延长;黄土地区沟道切坡建设与平山造地等人类工程活动强烈;小规模地质灾害致灾逐渐成为人员伤亡的主要成灾模式;低易发区在极端气候条件下发生大量地质灾害。

(2)强化地质灾害风险调查排查,夯实防控基础。围绕城区山体斜坡区、农村沟道斜坡段、高填方高开挖斜坡等地质灾害高危区开展精细化风险调查评价。探索开展低易发区极端条件下地质灾害风险调查评价。建立黄土地区地质灾害风险防范区的划定技术方法,构建风险防范区的年度动态调整机制。

(3)优化监测手段,强化技术支撑。加强精细化气象预警预报,推进西北地区地质灾害精细化风险预警模型试点应用,预警单元由县级到乡镇。推进适用黄土地质灾害突发性特点的GNSS变频解算算法完善与应用,加快雷达感测、智能视频等非接触式位移监测设备的野外功能验证,研发有效深度3~5 m及以上的土壤含水率监测设备,提升地质灾害风险预警能力。

(4)构建双控模式,提升防控成效。逐步构建地质灾害“隐患点+风险区”双控模式,形成“一点(隐患点)一区(风险区)一管控”网格化工作机制。构建地质灾害风险区划定技术方法,探索建立地质灾害风险区分类分级的源头管控机制,圈定地质灾害安全区范围,对中等级别以上风险区内的土地用途、工程活动建设类别和强度、空间规划等提出限制措施。

致谢:谨以此文庆祝中国地质调查局西安地质调查中心成立60周年。

## 参考文献(References):

黄玉华,冯卫,李政国. 陕北延安地区2013年“7.3”暴雨特征及地质灾害成灾模式浅析[J]. 灾害学,2014,29(2): 54-59.

HUANG Yuhua, FENG Wei, LI Zhengguo. Characteristics and geological disaster mode of the rainstorm happened on July 3, 2013 in Yanan area of Shaanxi province[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2):54-59.

雷祥义. 黄土高原河谷阶地黄土地层结构模式[J]. 海洋地质与第四纪地质,2006,26(2):113-122.

LEI Xiangyi. Model of loess stratigraphical structure on the terraces on the loess plateau of China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(2): 113-122.

李同录,习羽,侯晓坤. 水致黄土深层滑坡灾变机理[J]. 工程地质学报,2018,26(5):1113-1120.

LI Tonglu, XI Yu, HOU Xiaokun. Mechanism of surface water infiltration induced deep loess landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1113-1120.

刘文红. 黄土高原滑坡发育背景与成灾模式研究[D]. 西安:长安大学,2016.

LIU Wenhong. Study on background and disaster modes of landslides on Loess Plateau[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.

彭建兵,林鸿洲,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.

彭建兵,王启耀,门玉明,等. 黄土高原滑坡灾害[M]. 北京:科学出版社,2019.

彭建兵,王启耀,庄建琦,等. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制[J]. 地质力学学报,2020,26(5):714-730.

PENG Jianbing, WANG Qiyao, ZHUANG Jianqi, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 714-730.

孙萍萍,冯立,张茂省,等. 洛川典型剖面黄土的非饱和参数测试与分析[J]. 西北地质,2019b,52(2):148-157.

SUN Pingping, FENG Li, ZHANG Maosheng, et al. Measurement and parameters analysis for soil-water characteristic curve of unsaturated loess deposited at different time in the Luochuan section[J]. Northwestern Geology, 2019b, 52(2): 148-157.

孙萍萍,张茂省,程秀娟,等. 黄土高原地质灾害发生规律[J]. 山地学报,2019a,37(5):737-746.

SUN Pingping, ZHANG Maosheng, CHENG Xiujian, et al. On the regularity of geological hazards on the Loess Plateau in China[J]. Mountain Research, 2019a, 37(5): 737-746.

孙萍萍,张茂省,谷天峰,等. 基于改进电阻率层析成像技术

- 的黄土斜坡水分入渗原位监测[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 211-218.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, GU Tianfeng, et al. In-situ monitoring of water infiltration for loess slopes based on improved electrical resistivity tomography technique[J]. Journal of Lanzhou University: Nature Science, 2020, 56(2): 211-218.
- 孙萍萍, 张茂省, 冯立, 等. 黄土水敏性及其时空分布规律[J]. 西北地质, 2019c, 52(2): 117-124.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Water sensitivity of loess and its spatial-temporal distribution on the Loess Plateau [J]. Northwestern Geology, 2019c, 52(2): 117-124.
- 孙建中. 黄土学(上篇)[M]. 香港: 香港考古学会, 2005.
- SUN Jianzhong. Loessology (Vol. 1) [M]. Hong Kong: Hong Kong Archaeological Society, 2005.
- 唐亚明. 陕北黄土滑坡风险评价及监测预警技术方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- TANG Yaming. Methods on risk assessment and monitor & early-warning for the loess landslide in North of Shaanxi [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- 徐张建, 林再贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312.
- XU Zhangjian, LIN Zaiguan, ZHANG Maosheng. Loess in China and loess landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312.
- 许强, 彭大雷, 何朝阳, 等. 突发型黄土滑坡监测预警理论方法研究——以甘肃黑方台为例[J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 111-121.
- XU Qiang, PENG Dalei, HE Zhaoyang, et al. Theory and method of monitoring and early warning for sudden loess landslide: a case study at Heifangtai terrace[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 111-121.
- 薛强, 唐亚明, 白轩. 吕梁山区大宁县城地质灾害破坏模式及风险管控[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 151-162.
- XUE Qiang, TANG Yaming, BAI Xuan. Failure modes and risk control of geohazards in the county town of Daning in the Lvliang Mountains, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(1): 151-162.
- 曾磊. 季节性冻融过程黄土斜坡水文效应及其稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- ZENG Lei. Study on the hydrological effect and stability of loess slope on seasonal freezing-thawing process [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- 张茂省, 程秀娟, 董英, 等. 冻结滞水效应及其促滑机理——以甘肃黑方台地区为例[J]. 地质通报, 2013, 32(3): 852-860.
- ZHANG Maosheng, CHENG Xiujuan, DONG Ying, et al. The effect of frozen stagnant water and its impact on slope stability: A case study of Heifangtai, Gansu Province [J]. Geological bulletin of China, 2013, 32(3): 852-860.
- 张茂省, 胡炜, 孙萍萍, 等. 黄土水敏性与水致黄土滑坡研究现状与展望[J]. 地球环境学报, 2016, 7(4): 323-334.
- ZHANG Maosheng, HU Wei, SUN Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides [J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7(4): 323-334.
- 张茂省, 李林, 唐亚明, 等. 基于风险理念的黄土滑坡调查与编图研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(1): 43-51.
- ZHANG Maosheng, LI Lin, TANG Yaming, et al. Risk management based landslide investigation and mapping in loess area [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(1): 43-51.
- 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.
- ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530-540.
- 张茂省, 孙萍萍, 程秀娟, 等. 西北黄土高原区地质灾害综合研究报告[R]. 中国地质调查局西安地质调查中心, 2015.
- Derbyshire E, Dijkstra T A, Smalley I J, et al. Failure mechanism in loess and the effects of moisture content changes on remoulded strength [J]. Quaternary International, 1994, 24: 5-15.
- Feng L, Zhang M, Jin Z, et al. The genesis, development, and evolution of original vertical joints in loess [J]. Earth Science Reviews, 2021, 214: 103526.
- Garakani A A, Haeri S M, Khosravi A, et al. Hydro-mechanical behavior of undisturbed collapsible loessial soils under different stress state conditions [J]. Engineering Geology, 2015, 195(9): 28-41.
- Lu N, Likos W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2006, 48(9): 131-142.
- Sun Youbin, Clemens S C, MORRILL C, et al. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon [J]. Nature Geoscience, 2012, 5(1): 46-49.
- Wen B P, Yan Y J. Influence of structure on shear characteristics of the unsaturated loess in Lanzhou, China [J]. Engineering Geology, 2014, 168: 46-58.