

doi: 10.12029/gc20220801001

薛强,张茂省,董英,孟晓捷,郭小鹏,冯卫,洪勃,王涛,刘文辉,田中英,张戈,卢娜. 2023. 基于 DEM 和遥感的黄土地质灾害精细化风险识别——以陕北黄土高原区米脂县为例[J]. 中国地质, 50(3): 926–942.

Xue Qiang, Zhang Maosheng, Dong Ying, Meng Xiaojie, Guo Xiaopeng, Feng Wei, Hong Bo, Wang Tao, Liu Wenhui, Tian Zhongying, Zhang Ge, Lu Na. 2023. Refinement risk identification of loess geo-hazards based on DEM and remote sensing——Taking Mizhi County in the Loess Plateau of Northern Shaanxi as an example[J]. Geology in China, 50(3): 926–942(in Chinese with English abstract).

# 基于 DEM 和遥感的黄土地质灾害精细化风险识别 ——以陕北黄土高原区米脂县为例

薛强<sup>1</sup>,张茂省<sup>2</sup>,董英<sup>1</sup>,孟晓捷<sup>1</sup>,郭小鹏<sup>1</sup>,冯卫<sup>1</sup>,洪勃<sup>1</sup>,王涛<sup>1</sup>,  
刘文辉<sup>1</sup>,田中英<sup>1</sup>,张戈<sup>1</sup>,卢娜<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西 西安 710054;2. 西安交通大学,陕西 西安 710049)

**摘要:**【研究目的】黄土高原是中国地质灾害最严重的地区之一,精细化识别地质灾害隐患,掌握地质灾害风险底数,是有效精准防控黄土地质灾害的关键。【研究方法】本文以陕北黄土高原区米脂县为例,基于 2 m×2 m 精度 DEM 数据识别崩塌滑坡易发坡段,采用 0.2 m 分辨率遥感数据识别危险坡段,以自然村为单元实地调查危险坡段并评价其风险,通过递进的方式开展了黄土地质灾害隐患识别、调查和评价,构建了县域尺度黄土地质灾害精细化风险识别技术方法体系。【研究结果】结果表明:(1)米脂县共识别坡度大于 40°、坡高大于 20 m 的崩塌滑坡易发坡段 44716 个,识别有威胁对象的危险坡段 4198 个;(2)通过风险识别、实地调查和评价,摸清了米脂县地质灾害隐患风险底数,米脂县共发育地质灾害风险点 4406 处,其中极高风险点 11 处、高风险点 304 处、中风险点 1451 处、低风险点 2640 处;(3)DEM 和遥感识别风险点 3880 处,占风险点总数的 88.06%,识别正确率 92.42%;(4)2022 年 7—8 月,米脂县人口居住区共有 36 处地质灾害风险点发生灾情或险情,全部位于本次风险识别范围之内,其中极高风险 2 处、高风险 28 处、中风险 5 处、低风险 1 处,极高风险点发生灾险情比例为 18.18%,高风险点发生灾险情比例为 9.21%,风险识别结果得到了有效验证。【结论】研究成果显著减轻了米脂县地质灾害造成的损失,为黄土地质灾害有效精准防控提供了科学依据。

**关键词:**DEM;遥感;黄土地质灾害;精细化;风险识别;地质灾害调查工程;米脂县;陕西省

**创 新 点:**通过 DEM 识别、遥感核查和实地调查,构建了一套黄土地质灾害精细化风险识别技术方法体系,从源头上识别和评价潜在的地质灾害风险,努力解决地质灾害“隐患在哪里”、“风险有多高”等关键问题。

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)03-0926-17

## Refinement risk identification of loess geo-hazards based on DEM and remote sensing——Taking Mizhi County in the Loess Plateau of Northern Shaanxi as an example

XUE Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Maosheng<sup>2</sup>, DONG Ying<sup>1</sup>, MENG Xiaojie<sup>1</sup>, GUO Xiaopeng<sup>1</sup>, FENG Wei<sup>1</sup>,

收稿日期: 2022-08-01; 改回日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41731289)及中国地质调查局项目(DD20221739)联合资助。

作者简介: 薛强,男,1979年生,正高级工程师,主要从事地质灾害调查与研究工作;E-mail: xqiang@mail.cgs.gov.cn。

HONG Bo<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, LIU Wenhui<sup>1</sup>, TIAN Zhongying<sup>1</sup>, ZHANG Ge<sup>1</sup>, LU Na<sup>1</sup>

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

**Abstract:** This paper is the result of geo-hazards survey engineering.

**[Objective]** The Loess Plateau is one of the regions with the most serious geo-hazards in China. The key to effectively and accurately prevent and control the loess geo-hazards is to precisely identify the hidden geo-hazards dangers and thoroughly understand the number of geo-hazards risks. **[Methods]** This paper takes Mizhi County in the Loess Plateau region of northern Shaanxi as an example to perform the identification, investigation and evaluation of the hidden loess geo-hazards dangers step by step, and establish the system of refined risk identification technology method for the loess geo-hazards at the county level. The DEM data with resolution of 2 m×2 m is used to identify the slopes prone to induce collapses and landslides. The remote sensing data with resolution of 0.2 m is applied to identify the dangerous slopes. The natural village is taken as the unit to investigate the dangerous slopes and evaluate their risks. **[Results]** The results show that: (1) A total of 44716 landslide-prone slopes with inclination degree greater than 40° and height larger than 20 m and 4198 dangerous slopes with threatening objects were identified. (2) Through risk identification, field investigation and evaluation, the total number of geo-hazard risks in Mizhi County was thoroughly understand. There are 4406 geo-hazards risks, including 11 extremely high risks, 304 high risks, 1451 medium risks and 2640 low risks. (3) A number of 3880 risks accounting for 88.06% of the total risks were identified by the DEM and remote sensing with the identification accuracy of 92.42%. (4) From July to August 2022, 36 geo-hazards risks occurred, which are within the scope of this risk identification including 2 extremely high risks, 28 high risks, 5 medium risks and 1 low risk. The proportion of disasters located at extremely high risks is 18.18%, and the proportion of disasters occurred at high risks is 9.21%. The results of risk identification have been effectively verified. **[Conclusions]** The research results significantly reduced the losses caused by geo-hazards in Mizhi County, and provided scientific references for effectively and accurately preventing and controlling the loess geo-hazards.

**Key words:** DEM; remote sensing; loess geo-hazards; refinement; risk identification; geo-hazards survey engineering; Mizhi County; Shaanxi Province

**Highlights:** By means of DEM identification, remote sensing verification and field investigation, a system of refined risk identification technology method for loess geo-hazards has been developed to identify and evaluate potential geo-hazards risks from the source, and try hard to solve the key issues including "where are the hidden dangers" and "how high are the risks" of the geo-hazards.

**About the first author:** XUE Qiang, male, born in 1979, senior engineer, mainly engaged in geo-hazards investigation and research; E-mail: xqiang@mail.cgs.gov.cn.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China Key Program (No.41731289) and the project of China Geological Survey (No.DD20221739).

## 1 引言

西北黄土高原区生态环境脆弱,地质环境条件复杂,工程地质性质特殊,黄土具有水敏性、结构疏松、大孔隙和垂直节理发育等特点,导致黄土崩塌滑坡地质灾害易发、多发、频发,是中国地质灾害最为严重的地区之一(彭建兵等,2014;张茂省等,2016;Peng et al., 2019a; Feng et al., 2021)。黄土地质灾害呈现点多面广、规模小、突发性强等特点,主

要集中于每年3—5月冻融期和6—10月汛期发生,降雨、冻融和人类工程扰动是诱发黄土地质灾害的主要因素(薛强和张茂省,2018;彭建兵等,2019)。汛期降雨入渗过程中,黄土斜坡土体含水率升高,基质吸力降低,渗透性增强,使得潜在滑动面上的有效应力及抗剪强度降低,斜坡稳定性降低;冻融期反复冻结融化循环过程导致黄土斜坡土体内部结构损伤,力学性质变差,抗剪强度降低。人类工程扰动造成黄土斜坡应力集中并急剧增大,原有的

平衡状态被打破,从而诱发崩塌滑坡灾害(李同录等,2018;薛强等,2019;彭建兵等,2020)。

1999年以来,黄土地区先后开展了县(市)地质灾害调查与区划(1:100000)、地质灾害详细调查(1:50000)、重要城镇地质灾害风险调查(1:10000)等工作,通过一系列递进式调查评价工作,初步摸清了黄土地质灾害发育分布情况,划分了地质灾害易发区和危险区,建立了群测群防体系,显著减轻了地质灾害损失(薛强等,2018;刘传正和陈春林,2020;张茂省等,2021;孙萍萍等,2022)。近年来,随着对地观测技术的快速发展,InSAR、机载LiDAR、光学遥感等综合遥感技术在地质灾害调查识别中的应用越来越普遍,在防灾减灾中取得了较好成效(Bayer et al., 2017;葛大庆等,2019;许强等,2019;许强,2020;张永双等,2020;姚鑫等,2020;Zhang et al., 2020;张勤等,2022)。

然而,受极端气候变化和人类工程活动影响,黄土地质灾害仍呈高发态势(Peng et al., 2019b; Sun et al., 2021; Luo et al., 2023)。近年来,随着西北暖湿化气候不断加剧,降雨带的“西移北上”,黄土地区极端降雨频现,降雨强度与持时显著增加,加之日趋强烈的人类工程扰动,引发了大量的黄土地质灾害,例如,陕北黄土高原区2021年地质灾害发生数量是“十三五”期间平均值的4倍。新形势下黄土地质灾害防治还面临着许多薄弱环节,总体而言,黄土地质灾害调查评价精度较低,早期识别欠缺,监测预警难度大,隐患点风险底数不清,不能对地质灾害进行科学精准防控,严重危害人民群众生命财产安全和社会经济可持续发展。

因此,围绕黄土地区地质灾害防治重大需求,查明“隐患在哪里”、“风险有多高”,摸清黄土地质灾害风险底数,并进行有效精准防控,亟待充分应用新技术新方法,全面、系统地开展黄土地质灾害精细化风险识别,有针对性地进行地质灾害风险防控,努力把地质灾害损失降至最低。本文以陕北黄土高原区榆林市米脂县为例,利用高精度DEM和遥感技术有效识别黄土地质灾害隐患,并发动广大群众开展报险报灾,对基于DEM识别的高陡边坡和不稳定斜坡,以及群众报险报灾点逐一进行现场实地调查和风险评价,横向到边、纵向到底、不留死角,探索构建黄土地质灾害精细化风险识别技术方法体系和示范,为

地质灾害精准防治与管理提供科技支撑。

## 2 技术方法

### 2.1 技术思路

黄土崩塌滑坡地质灾害的发生主要受斜坡形态的控制,当斜坡的坡度、坡高不同时,其发生黄土崩塌滑坡的概率也不同,黄土崩塌滑坡多发生在高陡斜坡地带(薛强等,2020)。研究表明,当黄土斜坡坡度为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时,发生崩塌滑坡的比率为0.002%;当黄土斜坡坡度为 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 时,发生崩塌滑坡的比率为0.005%;当黄土斜坡坡度为 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,发生崩塌滑坡的比率为0.015%;当黄土斜坡坡度为 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 时,发生崩塌滑坡的比率为0.021%;当黄土斜坡坡度为 $50^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 时,发生崩塌滑坡的比率为0.043%;当黄土斜坡坡度大于 $55^{\circ}$ 时,发生崩塌滑坡的比率大于0.146%(图1)。当黄土斜坡坡高为20~40 m时,发生崩塌滑坡的比率为0.0015%;当黄土斜坡坡高为40~60 m时,发生崩塌滑坡的比率为0.003%;当黄土斜坡坡高为60~70 m时,发生崩塌滑坡的比率为0.009%;当黄土斜坡坡高为70~80 m时,发生崩塌滑坡的比率为0.0151%;当黄土斜坡坡高为80~90 m时,发生崩塌滑坡的比率为0.0453%;当黄土斜坡坡高大于90 m时,发生崩塌滑坡的比率大于0.1152%(图2,张茂省等,2011)。可以看出,随着坡度、坡高的逐渐增大,黄土斜坡发生崩塌滑坡的比率亦增大,说明坡度、坡高控制着黄土斜坡的

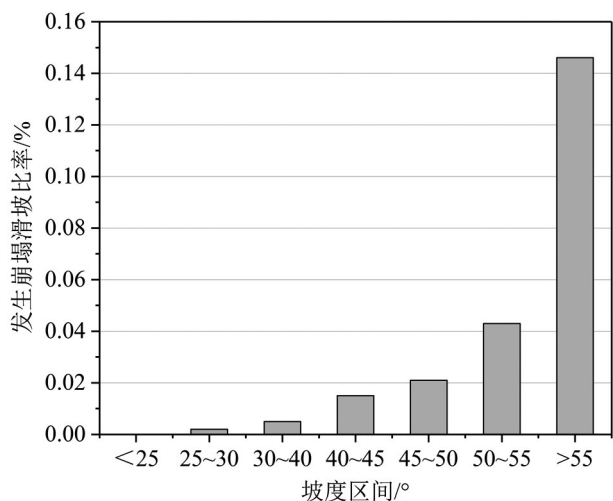


图1 不同坡度区间发生黄土崩塌滑坡的比率

Fig.1 The ratio of loess landslides in different slope intervals

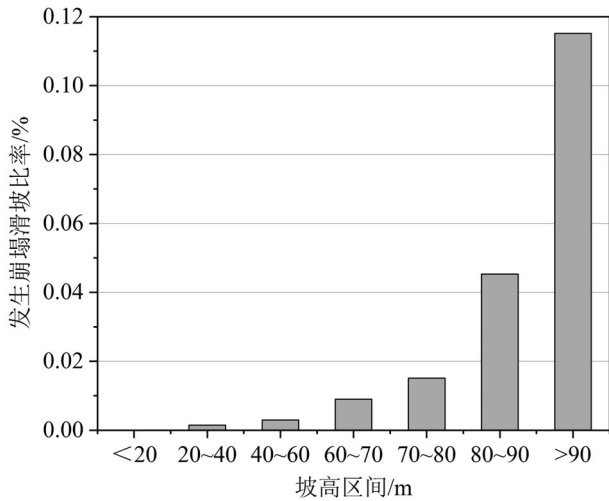


图2 不同坡高区间发生黄土崩塌滑坡的比率  
Fig.2 The ratio of loess landslides in different slope height intervals

稳定性及其变形破坏模式。

因此,可将坡度、坡高作为黄土崩塌滑坡易发坡段识别的主要控制因素,在此基础上,根据斜坡结构类型、岩土体工程地质性质、变形迹象等分析判断斜坡危险程度,最后根据威胁对象进行风险识别和评价。

### 2.2 技术流程

本研究基于高精度DEM和遥感影像识别崩塌滑坡易发坡段和危险坡段,利用精细化野外调查评价地质灾害危险程度和风险,技术流程主要包括以下步骤(图3)。

(1)根据黄土斜坡在不同坡度、坡高条件下发生崩塌滑坡的比率,基于DEM开展高陡黄土斜坡易发坡段识别,建立基于坡度和坡高的易发坡段识别阈值标准(如坡度 > 40°, 坡高 > 20 m),提取坡度和坡高指标,开展崩塌滑坡易发坡段识别,得到研究区基于DEM的易发坡段识别图(图4a)。

(2)对高易发坡段叠加高精度遥感影像开展承灾体和危险坡段识别,在高易发坡段识别图的基础上人机交互圈画有威胁对象的高陡斜坡单元,得到研究区基于遥感影像的危险坡段识别图(图4b)。

(3)对基于遥感影像识别的危险坡段逐一开展野外精细化调查,根据斜坡结构类型、岩土体工程地质性质、变形迹象、致灾距离、诱发因素等分析判断斜坡段危险程度,得到研究区基于野外调查的危

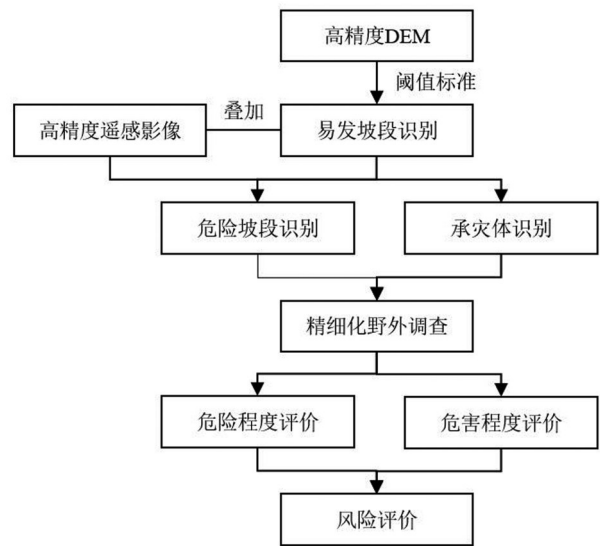


图3 基于DEM和遥感的崩塌滑坡地质灾害精细化风险识别方法流程

Fig.3 Process of refined risk investigation method for geo-hazards of collapse landslide based on DEM and remote sensing

险程度区划图(图4c)。

(4)对受危险坡段威胁的承灾体逐一开展现场调查,统计受威胁人数,估算威胁资产,并进行危害程度分级。

(5)对通过DEM和遥感没有识别出来的危险坡段,进行现场调查识别,研判其变形破坏模式,圈定可能的崩塌滑坡范围,调查其威胁对象,并确定危险程度和危害程度。

(6)对通过遥感影像和现场调查识别的所有危险坡段,开展风险评价分级,得到研究区地质灾害风险评价图(图4d)。

### 2.3 数据来源

本次研究数据来源于榆林市自然资源和规划局2 m×2 m高精度DEM和0.2 m分辨率遥感数据,数据获取时间均为2019年10月。

## 3 研究区概况

米脂县地处陕北黄土高原腹地,榆林市东南部,无定河中游,属黄土梁峁丘陵地貌,沟壑纵横,地形切割强烈。米脂县出露的地层岩性主要为晚更新世(Qp<sup>3</sup>)和中更新世(Qp<sup>2</sup>)黄土,下伏三叠系(T)和侏罗系(J)砂泥岩,在河谷地带分布有全新世冲积层(Qh<sup>al</sup>)。米脂县多年平均降水量为433.3 mm,



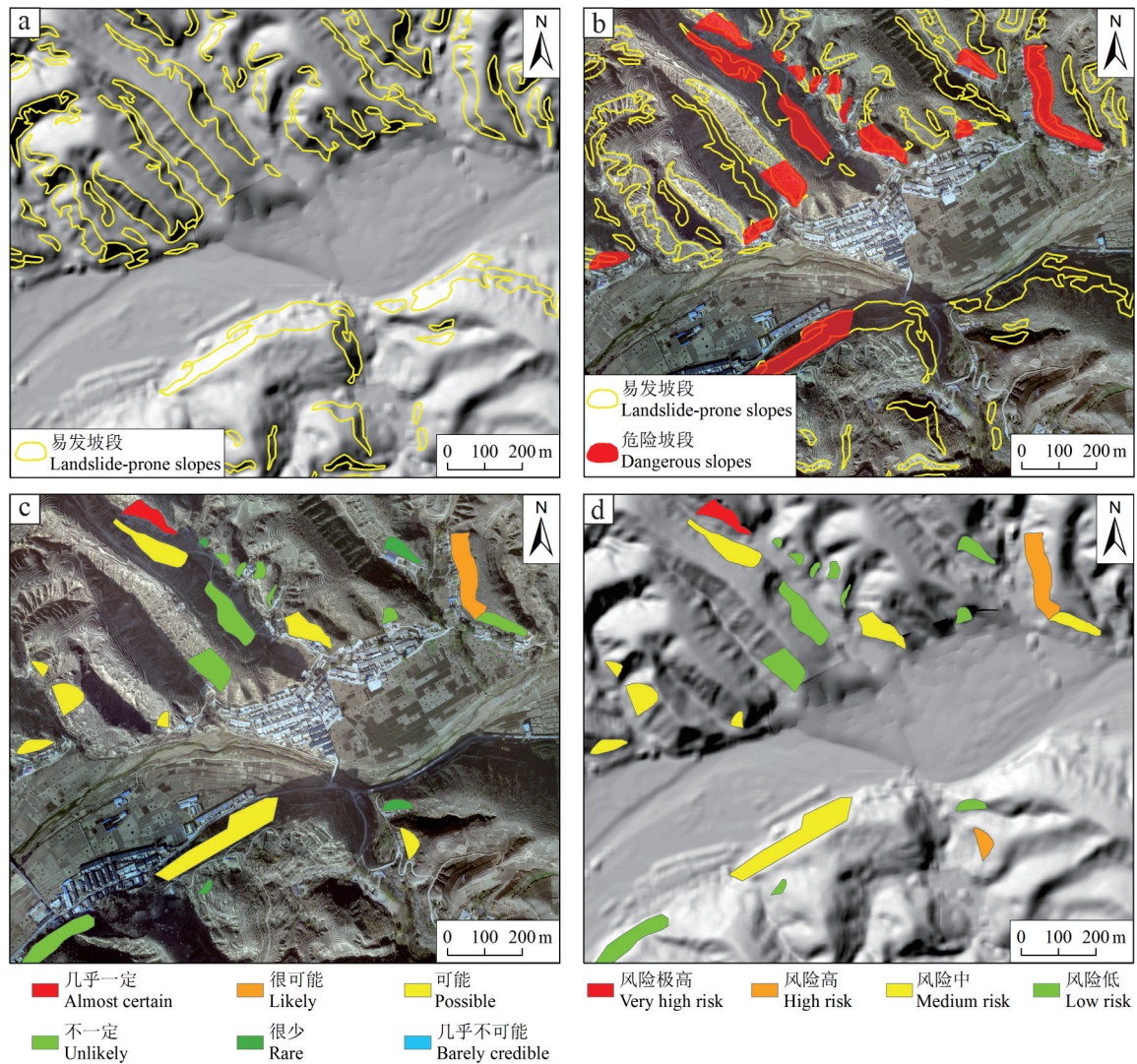


图4 典型地段基于DEM和遥感影像的地质灾害风险识别过程图  
a—DEM识别易发坡段;b—遥感识别危险坡段;c—野外调查危险程度;d—风险分级

Fig.4 Process map of geo-hazards identification based on DEM and remote sensing images in typical areas  
a—Landslide-prone slopes identification based on DEM; b—Dangerous slopes identification based on remote sensing images; c—Hazard degree identification based on field survey; d—Risk classification

年内降水量分配不均,在7—9月份多以雷阵雨或暴雨形式降落,占全年总降水量的77.3%。米脂县面积1178.7 km<sup>2</sup>,共9个镇(街道办),206个行政村。

米脂县黄土结构疏松,节理发育,具有水敏性。受地质环境条件的影响,米脂县崩塌滑坡地质灾害多发频发,滑坡以中小型浅层黄土滑坡为主,崩塌以中小型土质崩塌为主。崩塌滑坡地质灾害主要发育在河谷两侧边坡上和黄土梁峁区的陡坡地段,稳定性差或较差。近年来,陕北黄土高原地区气候呈现暖湿化,降水趋于极端化(李双双等,

2020),黄土沟道内切坡建设与平山造地等人类工程活动日趋强烈,引发了大量地质灾害。降雨和人类活动成为米脂县崩塌滑坡的主要诱发因素。

## 4 DEM易发坡段识别

### 4.1 易发坡段识别方法

米脂县地质构造简单,岩土体类型较单一,坡体物质组成主要为晚、中更新世黄土,崩塌滑坡地质灾害的发生主要受斜坡坡度、坡高的影响,坡度、坡高控制着斜坡的稳定性及其变形破坏模式。以

坡度、坡高为分类指标进行坡体划分,综合考虑坡度、坡高对斜坡稳定性的影响,筛选出具有一定规模或具有易发性的斜坡坡段(Xue et al., 2014; 王俊豪等, 2021)。

根据米脂县地质灾害发育特征,崩塌滑坡易发坡段主要集中在坡度大于 $40^{\circ}$ 和坡高大于20 m的斜坡地段。在ArcGIS平台下,利用 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 高精度DEM数据提取易发坡段,提取步骤如下:

(1)利用Spatial Analyst Tools→Surface→Slope坡度分析工具,计算米脂县域坡度,得到坡度分级图。

(2)利用Spatial Analyst Tools→Reclass→Reclassify重分类工具,提取米脂县坡度大于 $40^{\circ}$ 斜坡段。

(3)利用Conversion Tools→From Raster→Raster to Polygon转换工具,将米脂县坡度大于 $40^{\circ}$ 斜坡段转换为矢量多边形。

(4)由于坡度的不连续性,部分斜坡上会发育较平坦地段,因此在提取的大于 $40^{\circ}$ 斜坡段上会有孔洞存在,利用Data Management Tools→Generalization→Eliminate Polygon Part工具,消除斜坡多边形孔洞,将孔洞就近融合为斜坡单元。

(5)利用Spatial Analyst Tools→Zonal→Zonal Statistics工具,计算坡度大于 $40^{\circ}$ 斜坡单元坡高,提取坡高大于20 m的斜坡段,得到米脂县崩塌滑坡易发坡段识别图。

#### 4.2 易发坡段识别结果

米脂县共识别坡度大于 $40^{\circ}$ 的斜坡数量279657个;在此基础上,考虑坡高,并进行一定的融合后,共识别坡度大于 $40^{\circ}$ 、坡高大于20 m的崩塌滑坡易发坡段44716个,平均面积 $4935.82\text{ m}^2$ (图5)。DEM识别易发坡段面积合计共 $220.71\text{ km}^2$ ,占米脂县域面积的18.72%。

### 5 遥感危险坡段识别

#### 5.1 危险坡段识别方法

对米脂县基于DEM识别出的44716个易发坡段叠加高精度遥感影像数据,开展基于承灾体的危险坡段识别和核查。危险坡段识别内容包括承灾体和致灾体,具体识别方法为:在易发坡段识别图的基础上对米脂县所有承灾体(房屋建筑、主要道路等)均开展遥感核查,对受到易发坡段威胁的承

灾体人机交互圈画危险斜坡段,危险斜坡段圈画的原则主要考虑坡向和可能整体发生崩塌滑坡的斜坡体,最终得到米脂县基于遥感影像的危险坡段识别图(图6)。

#### 5.2 危险坡段识别结果

在DEM易发坡段识别的基础上,对遥感核查出有承灾体的致灾体进行全面识别和核查,人工圈画危险坡段。本次遥感识别和核查崩塌滑坡危险坡段(地质灾害疑似隐患)共4198个(图7),遥感核查危险坡段数量占DEM识别易发坡段数量的9.39%,进一步缩小了实地调查范围,增加了调查的针对性和有效性。遥感核查危险坡段面积合计共 $9.58\text{ km}^2$ ,占易发坡段面积的4.34%,占米脂县域面积的0.81%。危险坡段面积最小 $79.65\text{ m}^2$ ,面积最大 $42500.98\text{ m}^2$ ,平均 $2282.40\text{ m}^2$ 。

### 6 野外风险调查

#### 6.1 风险调查内容

风险调查以自然村为单元,县域范围全覆盖,确保做到横向到边、纵向到底、不留死角。风险调查内容主要包括DEM和遥感识别风险点、在册地质灾害隐患点、群众报险报灾点和现场新发现风险点。通过现场调查研判各风险点类型、变形破坏模式、主要特征、威胁对象、威胁范围,并进行危险程度和风险评价,提出防治措施建议。

#### 6.2 风险评价标准

地质灾害风险是危险程度和危害程度的函数(薛强等, 2021)。危险程度按斜坡失稳年概率分为几乎一定( $10^{-1}$ )、很可能( $10^{-2}$ )、可能( $10^{-3}$ )、不一定( $10^{-4}$ )、很少( $10^{-5}$ )、几乎不可能( $10^{-6}$ )6级(Australian Geomechanics Society, 2000, 2007);危害程度按威胁对象分为特大级(威胁人数 $>30$ 人,或威胁资产 $>1000$ 万元)、重大级(威胁人数 $10\sim 30$ 人,或威胁资产 $500\sim 1000$ 万元)、较大级(威胁人数 $3\sim 10$ 人,或威胁资产 $100\sim 500$ 万元)、一般级(威胁人数 $<3$ 人,或威胁资产 $<100$ 万元)4级。

综合考虑危险程度和危害程度,根据地质灾害风险评价分级表,将地质灾害风险等级划分为4个级别:极高、高、中、低(表1)。

由于野外判断斜坡失稳年概率较难,因此危险程度可根据斜坡坡度、坡高、变形迹象、物质组成等



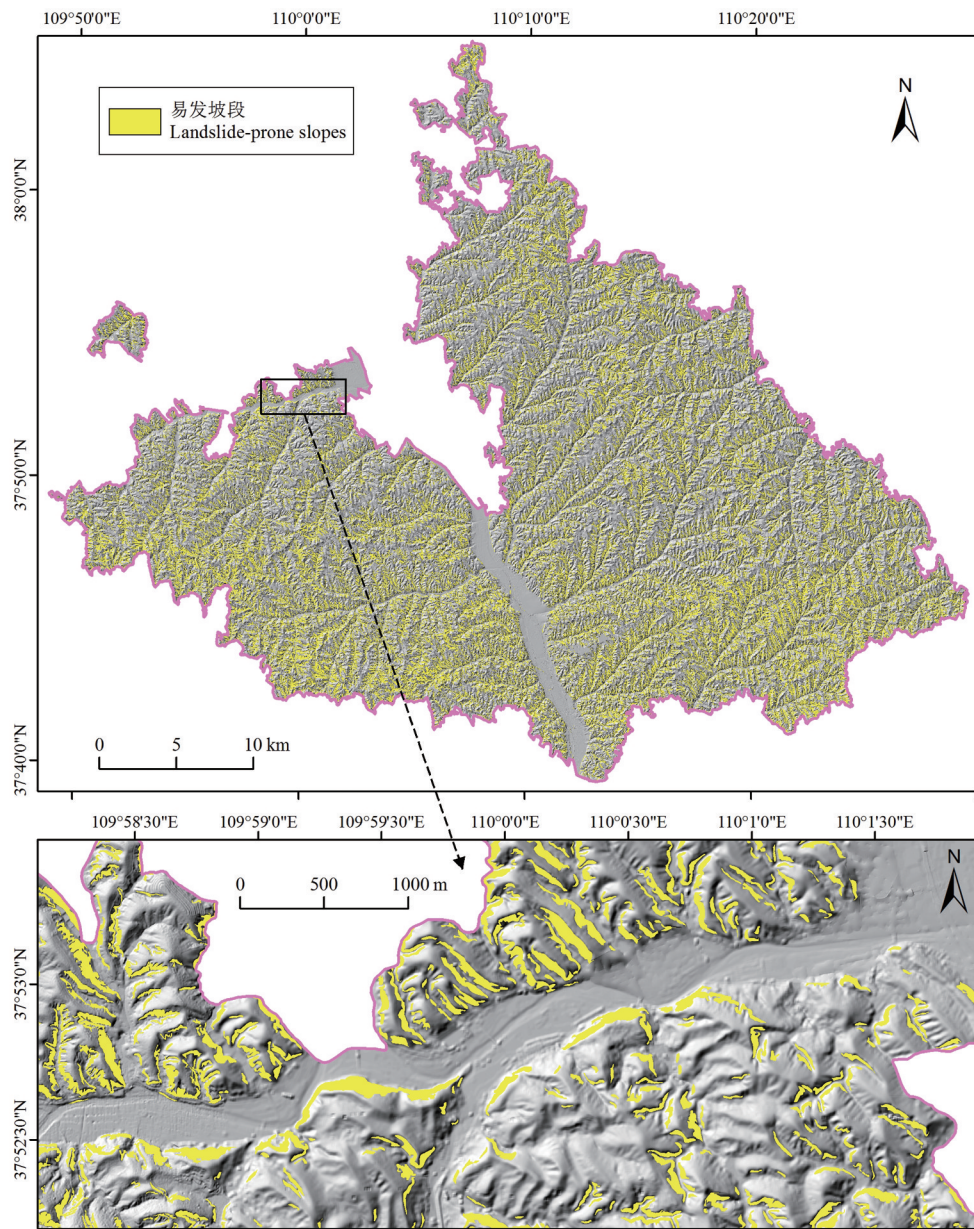


图5 米脂县基于DEM的崩塌滑坡易发坡段识别结果图

Fig.5 Map of the identification results of the slopes prone to collapse and landslides based on DEM in Mizhi County

综合判断。

(1)几乎一定:预期一定会发生地质灾害(坡体主要由 $Q_3$ 黄土组成,斜坡高陡破碎,近2年发生过较明显的变形现象)(图8a)。

(2)很可能:在降雨条件下会发生地质灾害(坡体主要由 $Q_3$ 黄土组成,斜坡高陡破碎,有局部变形现象)(图8b)。

(3)可能:在降雨条件下可能发生地质灾害(坡体主要由 $Q_2$ 或 $Q_3$ 黄土组成,斜坡高陡破碎,历史上

发生过变形迹象)(图8c)。

(4)不一定:在极端降雨条件下可能发生地质灾害(坡体主要由 $Q_2$ 或 $Q_3$ 黄土组成,坡高较小,变形迹象不明显)(图8d)。

(5)很少:只有在极端降雨、地震等特殊条件下可能发生地质灾害(坡体主要由 $Q_2$ 黄土组成,坡度、坡高均较小,无变形迹象)(图8e)。

(6)几乎不可能:不可能发生地质灾害(坡体主要由 $Q_2$ 黄土组成,坡度、坡高均很小,无变形迹象或



图6 基于遥感的危险坡段识别图

Fig.6 Identification map of dangerous slope section based on remote sensing

已工程治理)(图8f)。

### 6.3 风险调查结果

2022年4—5月,对DEM和遥感识别风险点、在册地质灾害隐患点、群众报险报灾点和现场新发现风险点开展了野外调查,共实地调查地质灾害风险点4406处,并根据风险评价分级表,对米脂县基于承灾体的斜坡风险点进行了危险程度和风险评价(图9,图10)。

### 6.4 风险识别结果分析

本次米脂县地质灾害风险识别主要由DEM和遥感识别风险点构成,DEM和遥感识别风险点3880处,占风险点总数的88.06%;在册隐患点119处,占风险点总数的2.70%;群众报险报灾点(现场新发现地质灾害风险点)407处,占风险点总数的9.24%(图11)。DEM和遥感识别疑似风险点4198处,实地核查之后确定为风险点的3880处,识别正确率92.42%。共识别极高、高风险点315处,其中DEM和遥感识别203处,占总数的64.44%;在册隐患点53处,占总数的16.83%;群众报险报灾点(现场新发现地质灾害风险点)59处,占总数的18.73%,极高、高风险点主要通过DEM和遥感识别(图12)。

按危险程度划分,几乎一定99处,占风险点总数的2.25%;很可能284处,占风险点总数的6.45%;可能1311处,占风险点总数的29.75%;不一定1733处,占风险点总数的39.33%;很少965处,占风险点总数的21.90%;几乎不可能14处,占风险点总数的

0.32%(图13)。

按风险等级划分,极高风险点11处,占风险点总数的0.25%;高风险点304处,占风险点总数的6.90%;中风险点1451处,占风险点总数的32.93%;低风险点2640处,占风险点总数的59.92%(图14)。

按灾害类型划分,滑坡风险258处,占风险点总数的5.86%;崩塌风险4146处,占风险点总数的94.10%;泥石流风险2处(在册隐患点),占风险点总数的0.05%(图15)。

### 6.5 地质灾害风险特征

(1)地质灾害风险集中发育在黄土沟道内。近年来,米脂县黄土区沟道内人类建设活动频繁,切坡建房、修路等形成了大量的人工高陡边坡,地质灾害风险呈现向切坡强烈区发展的趋势。

(2)地质灾害风险“点多面广”,以黄土崩塌风险为主。本次米脂县共识别和调查地质灾害风险点4406处,基本覆盖了全县大部分村镇,呈现出“点多面广”特征;地质灾害风险以黄土崩塌为主,识别崩塌风险4146处,占风险点总数的94.10%。

(3)地质灾害风险呈现向小型化发展的趋势。随着地质灾害防治体系建设逐步完善,中等及以上规模地质灾害已逐步实施工程治理或监测预警措施,小型地质灾害风险逐渐成为威胁人民生命财产安全的主要来源。

(4)地质灾害危害程度和避险能力均呈现降低趋势。近年来,随着城镇化建设的持续推进,农村



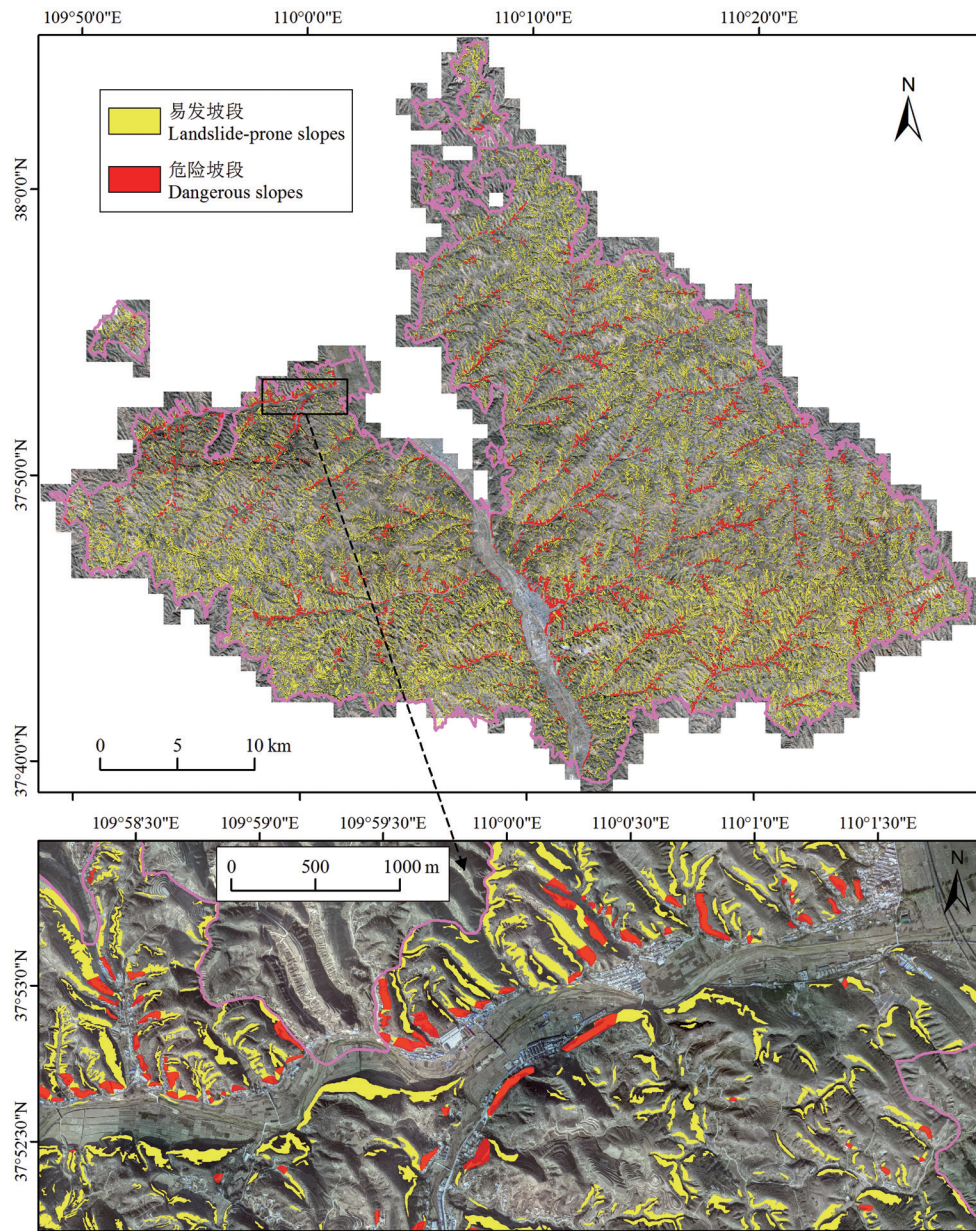


图7 米脂县基于遥感的危险坡段识别结果

Fig.7 Identification results of dangerous slope section based on remote sensing in Mizhi County

表1 地质灾害风险评价分级

**Table 1 Risk assessment grading scale of geo-hazard**

危险程度(年概率)	危害程度			
	特大级(特重)	重大级(重)	较高级(中)	一般级(轻)
几乎一定( $10^{-1}$ )	VH	VH	H	H
很可能( $10^{-2}$ )	VH	H	H	M
可能( $10^{-3}$ )	H	H	M	M
不一定( $10^{-4}$ )	H	M	L	L
很少( $10^{-5}$ )	M	L	L	L
几乎不可能( $10^{-6}$ )	L	L	L	L

注: VH—风险极高, H—风险高, M—风险中, L—风险低。

人口数量减少,受威胁人数降低;但同时,大多农村住户只剩老人,防灾避险能力降低。

### 6.6 风险识别结果应用和验证

本次地质灾害风险识别、调查和评价时间为2022年3—5月。2022年7月以来,米脂县出现6次强降雨天气过程,截至8月31日,米脂县累计降水量超过700 mm,比常年偏多106%,位居历史同期第1位。降雨频繁导致部分地区土壤含水量饱和或近饱和,引发了大量的崩塌滑坡地质灾害。针对严峻的





图8 野外判断斜坡危险程度典型斜坡段

a—“几乎一定”典型斜坡段;b—“很可能”典型斜坡段;c—“可能”典型斜坡段;d—“不一定”典型斜坡段;  
e—“很少”典型斜坡段;f—“几乎不可能”典型斜坡段(已工程治理)

Fig.8 Typical slope sections for judging the danger of slopes in the field

a—"Almost certain" slope sections; b—"Likely" slope sections; c—"Possible" slope sections; d—"Unlikely" slope sections;  
e—"Rare" slope sections; f—"Barely credible" slope sections (engineering treatment has been completed)



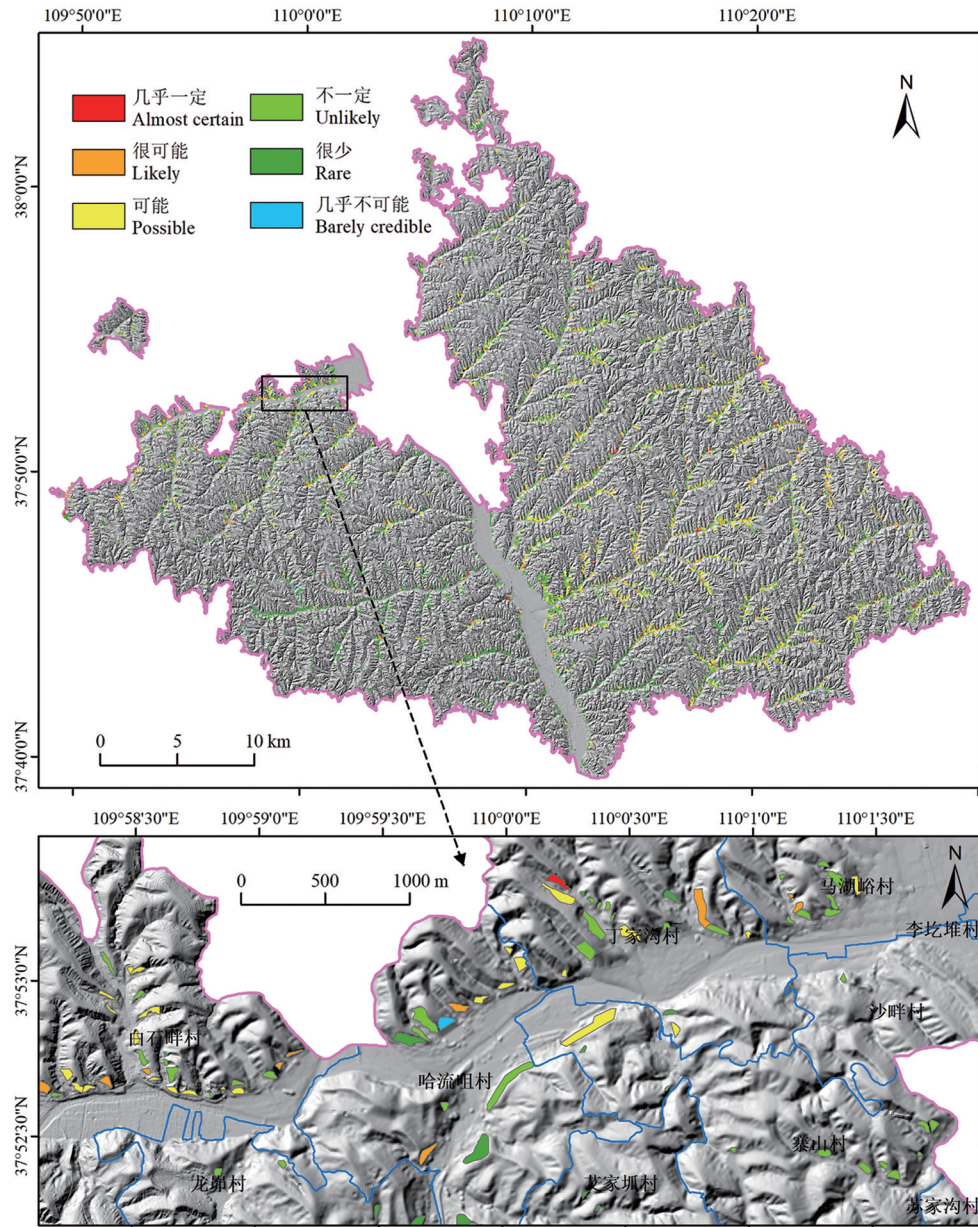


图9 米脂县斜坡危险程度分布图  
Fig.9 Distribution map of slope hazard degree in Mizhi County

防汛形势,米脂县高度重视,紧盯每一次强降水过程,提前预报降雨落区,及时发布风险预警,并根据本次风险识别结果,果断撤离受威胁群众,努力将地质灾害造成的损失降到最低。

2022年7—8月,米脂县人口居住区共有36处隐患点发生崩塌滑坡灾情或险情,全部位于本次风险识别范围之内,其中极高风险2处、高风险28处、中风险5处、低风险1处(表2)。极高风险点发生灾情比例为18.18%,高风险点发生灾情比例为

9.21%,风险识别结果得到了有效验证。由于风险管控措施到位,36处风险点发生灾险情后均未造成人员伤亡,显著减轻了地质灾害造成的损失。

## 7 结 论

(1)基于DEM和遥感技术开展了米脂县崩塌滑坡易发坡段和危险坡段早期识别,试图解决“隐患在哪里”,为地质灾害风险实地调查提供了有效靶区,起到事半功倍效果。通过1:1万DEM识别米



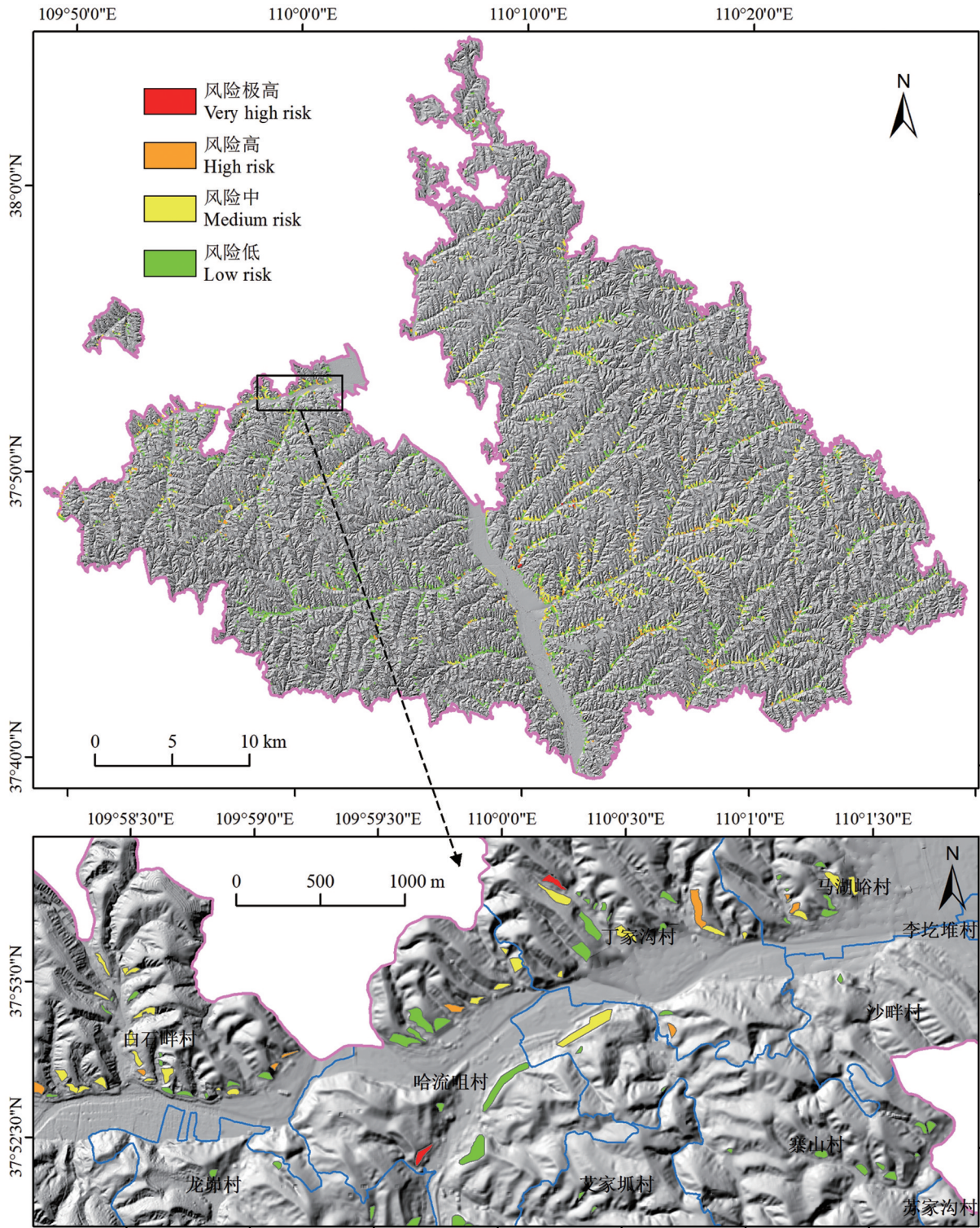


图10 米脂县地质灾害风险点分布图  
Fig.10 Distribution map of geo-hazards risk in Mizhi County



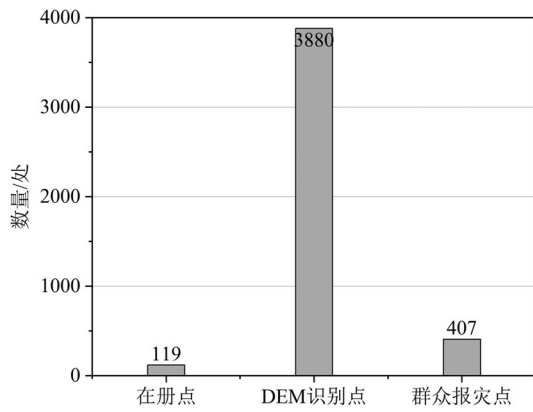


图11 总风险点按识别类型划分

Fig.11 Histogram of total risk points by identification type

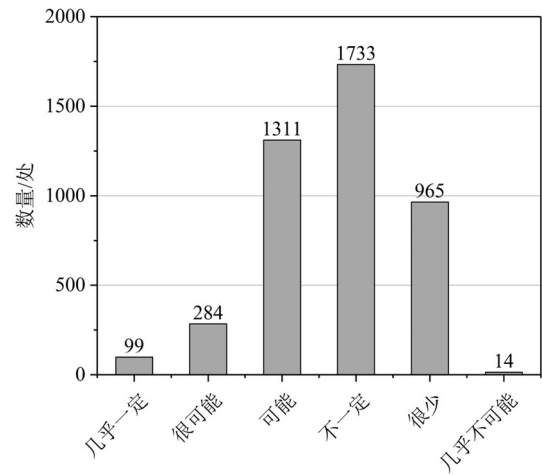


图13 按危险程度划分

Fig.13 Histogram by hazard degree

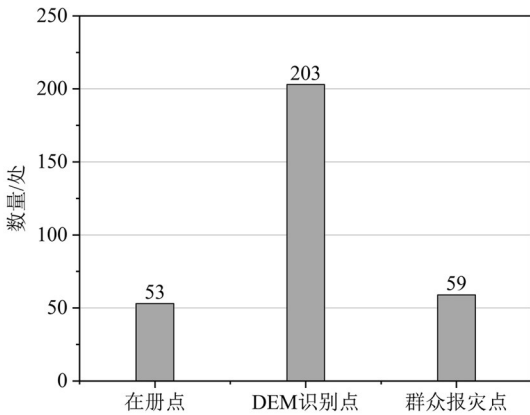


图12 极高、高风险点按识别类型划分

Fig.12 Histogram of very high and high risk points by identification type

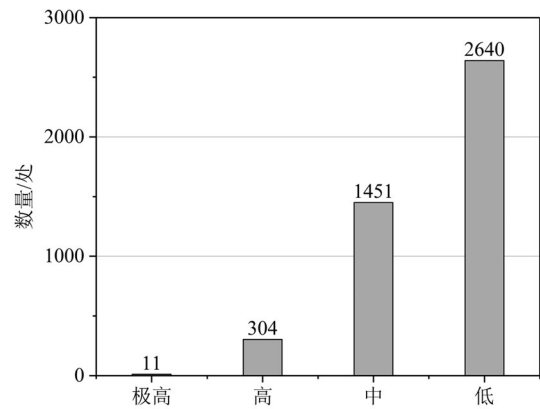


图14 按风险等级划分

Fig.14 Histogram by risk level

脂县坡度大于40°、坡高大于20 m的崩塌滑坡易发坡段44716个,在此基础上,通过高分辨率遥感数据识别有威胁对象的危险坡段4198个。

(2)通过实地调查,摸清了米脂县地质灾害风险底数,努力解决地质灾害隐患“风险有多高”,为地质灾害综合防控提供了科学依据。以自然村为单元,县域范围全覆盖,对DEM和遥感识别风险点、在册隐患点、群众报险报灾点(现场新发现地质灾害风险点)等逐一进行现场调查,横向到边、纵向到底、不留死角,共实地调查地质灾害风险点4406处,其中极高风险点11处、高风险点304处、中风险点1451处、低风险点2640处。

(3)结合实际划分风险等级,对每个风险点提

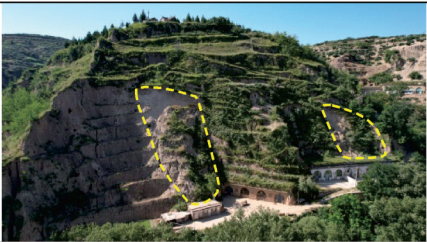
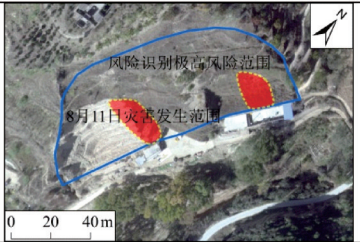

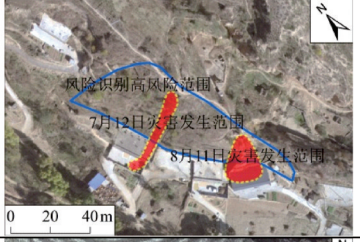

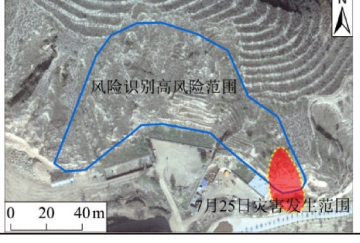

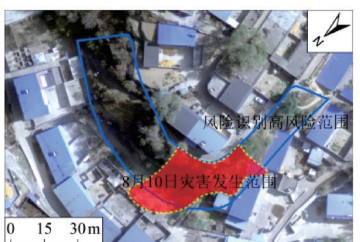
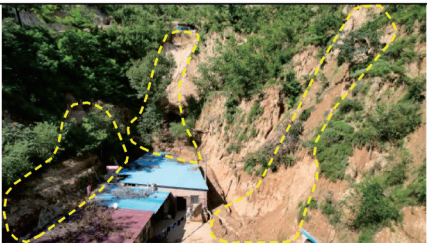
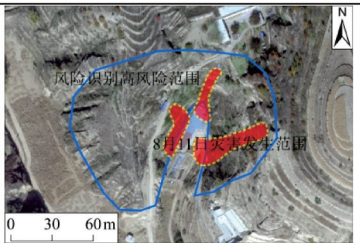

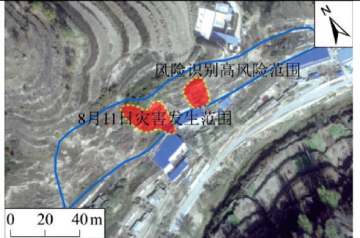
出有针对性的防控措施建议,建立风险台账,移交市、县、镇(街道办)各级政府应用。2022年7—8月,米脂县人口居住区共有36处隐患点发生崩塌滑坡灾情或险情,全部位于本次风险识别范围之内,风险识别结果得到了有效验证,且由于风险管控措施到位,36处风险点发生灾险情后均未造成人员伤亡,显著减轻了地质灾害造成的损失。

(4)聚焦地质灾害“隐患在哪里”、“风险有多高”等关键科学问题,形成了一套以DEM识别、遥感核查和野外调查为主线的黄土地质灾害精细化风险识别和调查工作技术方法体系。

**致谢:**本文在野外调查和资料收集过程中得到了榆林市自然资源和规划局、米脂县自然资源和规


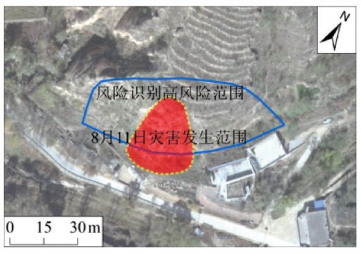

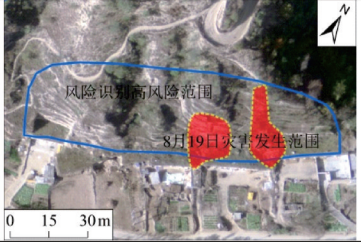

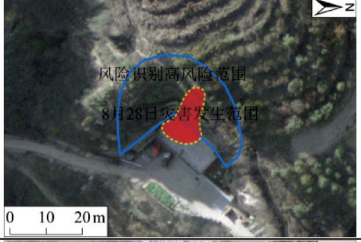

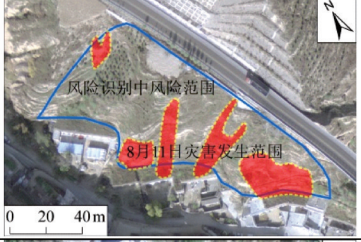



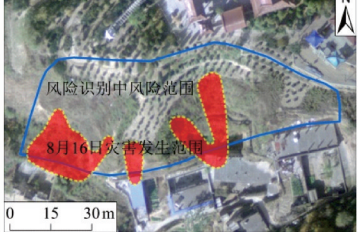
表2 米脂县2022年7—8月强降雨诱发典型地质灾害一览

Table 2 Typical geological hazards induced by heavy rainfall in Mizhi county from July to August 2022

发生时间	编号	名称	风险等级	灾情情	灾情发生后照片	灾情发生范围与风险识别范围对比
2022.08.11	MZ X26 36	印斗镇马家铺村申巨屋后滑坡隐患	极高	发生2次滑塌, 损伤窑洞		
2022.07.12, 2022.08.11	MZ X17 67	印斗镇桥沟村曹家沟滑坡隐患	高	发生2次滑塌, 损坏房屋2间		
2022.07.25, 2022.08.15	MZ X30 06	龙镇苏家村杨发兰家后崩塌隐患	高	发生2次崩塌, 损坏窑洞, 掩埋15包粮食		
2022.08.10	MZ X00 09	银州街道办吴家沟村活动广场黄土崩塌隐患	高	发生大面积滑塌, 损伤房屋和坡顶道路		
2022.08.11	MZ X00 61	桃镇申家村申良家崩塌隐患	高	发生3处滑塌, 损坏房屋2间		
2022.08.11	MZ X01 17	桃镇申家村余国家屋后崩塌隐患	高	发生滑塌, 坡顶出现裂缝, 窑掌渗水		



续表2

发生时间	编号	名称	风险等级	灾险情	灾险情发生后照片	灾险情发生范围与风险识别范围对比
2022.08.11	MZ X14 37	印斗镇赵家石畔村赵建飞-赵所和屋后崩塌	高	发生崩塌, 损伤窑洞		
2022.08.19	MZ X43 74	城郊镇官庄村艾绳家窑后崩塌隐患	高	发生2处崩塌, 损伤窑洞		
2022.08.28	MZ X06 39	印斗镇高沟村高建强屋后崩塌隐患	高	发生崩塌, 损伤窑洞		
2022.08.11	MZ X02 71	银州街道办申地沟东坡崩塌	中	发生大范围坡面泥石流, 损伤窑洞		
2022.08.11	MZ X06 33	银州街道办上巷南关梁崩塌隐患	中	发生坡面泥石流, 损伤窑洞		
2022.08.16	MZ X01 56	银州街道办艾绳朝屋后滑坡隐患	中	发生大面积坡面泥石流, 坡顶出现裂缝, 损伤窑洞		

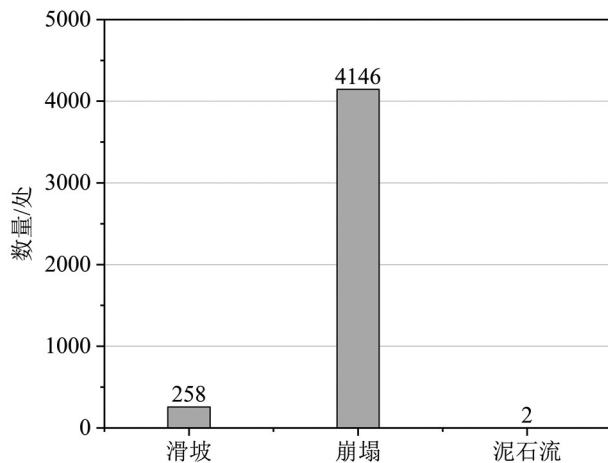


图15 按灾害类型划分

Fig.15 Histogram by geo-hazards type

划局、米脂县各镇(街道办)和各村干部的大力支持帮助,在此表示衷心感谢!

## References

- Australian Geomechanics Society. 2000. Landslide risk management concepts and guidelines[J]. *Australian Geomechanics*, 35(1): 49–92.
- Australian Geomechanics Society. 2007. Landslide risk management practice note[J]. *Australian Geomechanics*, 42(1): 64–114.
- Bayer B, Simoni A, Schmidt D, Bertello L. 2017. Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy[J]. *Engineering Geology*, 226: 20–32.
- Feng L, Zhang M S, Jin Z, Zhang S S, Sun P P, Gu T F, Liu X B, Lin H, An Z S, Peng J B, Guo L. 2021. The genesis, development, and evolution of original vertical joints in loess[J]. *Earth- Science Reviews*, 214: 103526.
- Ge Daqing, Dai Keren, Guo Zhaocheng, Li Zhenhong. 2019. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 949–956 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuangshuang, Kong Feng, Han Lu, Yan Junping, Wang Chengbo, Wu Yaqun. 2020. Spatiotemporal variability of extreme precipitation and influencing factors on the Loess Plateau in northern Shaanxi province[J]. *Geographical Research*, 39(1): 140–151 (in Chinese with English abstract).
- Li Tonglu, Xi Yu, Hou Xiaokun. 2018. Mechanism of surface water infiltration induced deep loess landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26(5): 1113–1120 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chuanzheng, Chen Chunli. 2020. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(2): 375–383 (in Chinese with English abstract).
- Luo Li, Guo Wenzhao, Tian Pei, Liu Yili, Wang Shaokun, Luo Jiawei. 2023. Unique landslides (loess slide-flows) induced by an extreme rainstorm in 2018 on the Loess Plateau: A new geological hazard and erosion process[J]. *International Journal of Sediment Research*, 38(2): 228–239.
- Peng J B, Wang S K, Wang Q Y, Zhuang J Q, Huang W L, Zhu X H, Leng Y Q, Ma P H. 2019a. Distribution and genetic types of loess landslides in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 170: 329–350.
- Peng J B, Fan Z J, Wu D, Huang Q B, Wang Q Y, Zhuang J Q, Che W Y. 2019b. Landslides triggered by excavation in the loess plateau of China: A case study of Middle Pleistocene loess slopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 171: 246–258.
- Peng Jianbing, Lin Hongzhou, Wang Qiyao, Zhuang Jianqi, Cheng Yuxiang, Zhu Xinghua. 2014. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. *Journal of Engineering Geology*, 22(4): 684–691 (in Chinese with English abstract).
- Peng Jianbing, Wang Qiyao, Men Yuming, Xu Qiang, Zhuang Jianqi. 2019. Landslides at the Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Peng Jianbing, Wang Qiyao, Zhuang Jianqi, Leng Yanqiu, Fan Zhongjie, Wang Shaokai. 2020. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (5): 714–730 (in Chinese with English abstract).
- Sun P, Wang H J, Wang G, Li R J, Zhang Z, Huo X T. 2021. Field model experiments and numerical analysis of rainfall-induced shallow loess landslides[J]. *Engineering Geology*, 295: 106411.
- Sun Pingping, Zhang Maosheng, Jia Jun, Cheng Xiujuan, Zhu Lifeng, Xue Qiang, Wang Jiayun. 2022. Geo-hazards research and investigation in the Loess Regions of Western China[J]. *Northwestern Geology*, 55(3): 96–107 (in Chinese with English abstract).
- Wang Junhao, Wei Yunjie, Mei Aoshuang, Guan Jianjun, Ding Xiang, Wang Shuangting. 2021. Multidimensional extraction of UAV tilt photography-based information of loess landslide and its application[J]. *Geology in China*, 48(2): 388–401 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. 2019. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 957–966 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qiang. 2020. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 45(11): 1651–1659 (in Chinese with English abstract).
- Xue Q, Zhang M S, Zhu L F, Cheng X J, Pei Y, Bi J B. 2014. Quantitative deformation analysis of landslides based on multi-period DEM data[C]. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, 2: 201–207.
- Xue Qiang, Zhang Maosheng. 2018. Monitoring, early warning and



- deformation characteristics of Yantu'an landslide in Yan'an[J]. *Northwestern Geology*, 51(2): 220–226 (in Chinese with English abstract).
- Xue Qiang, Zhang Maosheng, Gao Bo, Zhang Jianlong. 2018. Risk assessment of geological hazards in Suide city, Shaanxi Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26(3): 711–719 (in Chinese with English abstract).
- Xue Qiang, Zhang Maosheng, Bi Junbo, Wang Xiaofei, Lin Longchao. 2019. Exfoliation erosion and deformation failure of excavated loess slope[J]. *Northwestern Geology*, 52(2): 158–166 (in Chinese with English abstract).
- Xue Qiang, Zhang Maosheng, Gao Bo. 2020. Hazard assessment of loess landslide based on soil moisture content and supported by slope unit in Qingjian City, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 47(6):1904–1914 (in Chinese with English abstract).
- Xue Qiang, Tang Yaming, Bai Xuan. 2021. Failure modes and risk control of geohazards in the county town of Daning in the Lüliang Mountains, China[J]. *Mountain Research*, 39(1): 151–162 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xin, Deng Jianhui, LIU Xinghong, Zhou Zhenkai, Yao Jiaming, Dai Fuchu, Ren Kaiyu, Li Lingjing. 2020. Primary recognition of active landslides and development rule analysis for pan Three-river-parallel Territory of Tibet Plateau[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 52(5): 16–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Maosheng, Li Lin, Tang Yaming, Xue Qiang, Sun Pingping, Cheng Xiujuan. 2011. Risk management based landslide investigation and mapping in loess area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 19(1): 43–51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Maosheng, Hu Wei, Sun Pingping, Wang Xuilian. 2016. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides[J]. *Journal of Earth Environment*, 7(4): 323–334 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Maosheng, Xue Qiang, Jia Jun, Xu Jiwei. 2021. Theory, Method and Practice of Geological Hazard Risk Management[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhang Qin, Zhao Chaoying, Chen Xuerong. 2022. Technical progress and development trend of geological hazards early identification with multi-source remote sensing[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(6): 885–896 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Meng X M, Dijkstra T A, Jordan C J, Chen G, Zeng R Q, Novellino A. 2020. Forecasting the magnitude of potential landslides based on InSAR techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 241: 111738.
- Zhang Yongshuang, Liu Xiaoyi, Yao Xin. 2020. InSAR-based method for early recognition of ancient landslide reactivation in Dadu River, China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51(5): 545–555 (in Chinese with English abstract).
- 中综合遥感应用的思考与建议[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(7): 949–956.
- 李双双, 孔锋, 韩鹭, 延军平, 汪成博, 武亚群. 2020. 陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. *地理研究*, 39(1): 140–151.
- 李同录, 习羽, 侯晓坤. 2018. 水致黄土深层滑坡灾变机理[J]. *工程地质学报*, 26(5): 1113–1120.
- 刘传正, 陈春利. 2020. 中国地质灾害防治成效与问题对策[J]. *工程地质学报*, 28(2): 375–383.
- 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 庄建琦, 成玉祥, 朱兴华. 2014. 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*, 22(4): 684–691.
- 彭建兵, 王启耀, 门玉明, 许强, 庄建琦. 2019. 黄土高原滑坡灾害[M]. 北京: 科学出版社.
- 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 冷艳秋, 范仲杰, 王少凯. 2020. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制[J]. *地质力学学报*, 26(5): 714–730.
- 孙萍萍, 张茂省, 贾俊, 程秀娟, 朱立峰, 薛强, 王佳运. 2022. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J]. *西北地质*, 55(3): 96–107.
- 王俊豪, 魏云杰, 梅傲霜, 管建军, 丁祥, 王双亭. 2021. 基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡信息多维提取与应用分析[J]. *中国地质*, 48(2): 388–401.
- 许强, 董秀军, 李为乐. 2019. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 44(7): 957–966.
- 许强. 2020. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 45(11): 1651–1659.
- 薛强, 张茂省. 2018. 延安黄土安滑坡监测预警及变形特征[J]. *西北地质*, 51(2): 220–226.
- 薛强, 张茂省, 高波, 张建龙. 2018. 陕西省绥德县城区地质灾害风险评估[J]. *工程地质学报*, 26(3): 711–719.
- 薛强, 张茂省, 毕俊攀, 王晓飞, 林隆超. 2019. 开挖型黄土边坡剥落侵蚀作用及变形破坏研究[J]. *西北地质*, 52(2): 158–166.
- 薛强, 张茂省, 高波. 2020. 斜坡单元支持下基于土体含水率的陕西省清涧县城区黄土滑坡危险性评价[J]. *中国地质*, 47(6): 1904–1914.
- 薛强, 唐亚明, 白轩. 2021. 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*, 39(1): 151–162.
- 姚鑫, 邓建辉, 刘星洪, 周振凯, 姚佳明, 戴福初, 任开瑛, 李凌婧. 2020. 青藏高原三江并流区活动性滑坡InSAR初步识别与发育规律分析[J]. *工程科学与技术*, 52(5): 16–37.
- 张茂省, 李林, 唐亚明, 薛强, 孙萍萍, 程秀娟. 2011. 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*, 19(1): 43–51.
- 张茂省, 胡炜, 孙萍萍, 王雪莲. 2016. 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J]. *地球环境学报*, 7(4): 323–334.
- 张茂省, 薛强, 贾俊, 徐继维. 2021. 地质灾害风险管理理论与方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 张勤, 赵超英, 陈雪蓉. 2022. 多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势[J]. *测绘学报*, 51(6): 885–896.
- 张永双, 刘筱怡, 姚鑫. 2020. 基于InSAR技术的古滑坡复活早期识别方法研究——以大渡河流域为例[J]. *水利学报*, 51(5): 545–555.

## 附中文参考文献

葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 李振洪. 2019. 重大地质灾害隐患早期识别