

# 黄土丘陵沟壑区坡体稳定性影响因素分析

张庚<sup>1,2</sup>, 王志强<sup>1,2</sup>, 朱喆<sup>1,2</sup>

(1.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2.北京师范大学地理科学学部, 北京 100075)

**摘要:**选取黄土丘陵沟壑区纸坊沟小流域为研究区,利用高精度遥感影像(分辨率 0.068 m)和 DEM(分辨率 0.34 m)数据,结合野外调查,对崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴等失稳体进行识别,通过统计学、敏感系数方法,利用识别失稳体数据,分析不同类型失稳体空间分布状况,定量研究不同类型失稳体的影响因子敏感程度,揭示不同类型失稳体的主控因子,进一步阐明流域坡体失稳体的空间分布规律和影响坡体稳定性的主控因子。结果表明:(1)利用高精度遥感影像,获取流域失稳体,主要是以小规模和浅层的脱落、崩塌和滑塌为主,三者面积合计为 0.417 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 5.04%。(2)评价因子内部中,土壤母质的红黏土、土地利用的天然灌木林地和草地、地貌部位的沟坡、坡度>35°、地形起伏度为 0.74~3.34 m 是坡体失稳发生的高敏感区域,也是崩塌、滑塌、脱落和陷穴发育共有的敏感区域。(3)影响坡体稳定性主控因子权重由大到小为土壤母质、地形起伏度、坡度、土地利用和坡向。崩塌、滑塌和脱落的主控因子与整体坡体稳定性的主控因子相同,但因子内部权重存在差异。崩塌与整体坡体稳定性影响因子顺序分布一致。滑塌主控因子权重由大到小为土壤母质>地形起伏度=坡度>土地利用>坡向>地貌部位。脱落主控因子权重由大到小为土壤母质>土地利用>地形起伏度>坡度=坡向>地貌部位。滑坡的主控因子为坡度和地形起伏度。陷穴的主控因子权重由大到小为土壤母质>地形起伏度>坡度>坡向。

**关键词:**黄土丘陵沟壑区;滑塌;敏感性;地形因子;无人机

**中图分类号:**S157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-2242(2022)03-0107-09

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.03.016

## Analysis on Influencing Factors of Slope Stability in Loess Hilly and Gully Region

ZHANG Geng<sup>1,2</sup>, WANG Zhiqiang<sup>1,2</sup>, ZHU Zhe<sup>1,2</sup>

(1.State key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract:** The Zhifanggou watershed in the loess hilly and gully region was selected as the study area in this study. By high-precision remote sensing images (resolution 0.068 m) and DEM (resolution 0.34 m) data, combined with field investigations, the collapse, slide, landslide, creep and sinkhole were analyzed. The spatial distribution of different types of instability bodies were analyzed by using statistics and sensitivity coefficient methods. The main controlling factors of instability bodies were further clarified. The results showed that: (1) The instability bodies was obtained using high-precision remote sensing images, mainly in the form of small-scale and shallow shedding, collapse and slide. The total area of the three was 0.417 km<sup>2</sup>, accounting for 5.04% of the total watershed area. (2) Among the evaluation factors, the red clay of the soil parent material, the natural shrubland and grassland of the land use, the ditch slope of the landform, the slope of > 35° and RF of 0.74~3.34 m, were the highly sensitive areas where slope instability occurred. They are also the common sensitive area for collapse, slide, shedding, and sinkhole. (3) The weights of the main controlling factors affecting the stability of the slope were as following from large to small soil parent material, RF, slope, land use and aspect. The main controlling factors of collapse, slide and shedding were the same as the overall slope stability, but their internal weights of the factors were different. The order of the weights of the main controlling factors of collapse was consistent with the overall slope stability. The weights of the main controlling factors of landslide were as follows: soil parent material > RF = slope > land use > slope as-

收稿日期:2021-11-01

资助项目:国家自然科学基金项目(42130701)

第一作者:张庚(1992—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀及生态灾害研究。E-mail:201621170061@mail.bnu.edu.cn

通信作者:王志强(1968—),男,副教授,主要从事土壤侵蚀与土地生产力研究。E-mail:wangzhiqiang@bnu.edu.cn

pect > landform position. The weights of the main controlling factors of shedding was soil parent material > land use >  $RF$  > slope = slope aspect > landform position. The main controlling factors of landslide were slope and  $RF$ . The weights of the main controlling factors of caverns was soil parent material >  $RF$  > slope > slope aspect.

**Keywords:** the Loess Hill and Gully region; landslide; sensitivity; terrain factor; UAV

黄土高原作为我国典型的生态脆弱区之一,也是作为水土流失治理的重点地区<sup>[1-2]</sup>。经过多年的综合治理工作,生态与环境得到明显好转,水土流失强度和面积大大降低<sup>[3-4]</sup>。尤其黄土丘陵沟壑区表现最为突出,其植被指数年平均增长速率是黄土高原平均水平的 1.5 倍<sup>[3]</sup>。尽管黄土高原水土流失治理取得瞩目成就,但仍然没有改变其作为生态脆弱区的现状,依然有 1/2 水土流失面积尚未得到治理,各种类型的失稳现象,尤其是过去被人们忽略的小型 and 浅层失稳体星罗棋布。这些小型和浅层失稳体(崩塌、滑塌、滑坡等)是黄土高原水土流失主要的泥沙来源,严重影响人民生产生活,制约当地经济发展<sup>[5]</sup>。同时,小型失稳体本身在不断发展变化之中,其对黄土高原的土壤侵蚀和水土流失治理,进而对生态与环境的影响还不甚清楚。因此,借助无人机获取高分辨率遥感影像和高精度 DEM 数据,弄清楚小型失稳体的规模、空间分布格局和主控影响因素显得十分必要。

黄土丘陵沟壑区特殊的地形地貌、气候环境,存在的坡体失稳形式多种多样,崩塌、滑塌、滑坡、陷穴等是黄土丘陵沟壑区常见的失稳现象<sup>[6]</sup>。目前,利用无人机获取的高精度遥感数据解译、识别区域滑坡、崩塌等失稳体、研究小型滑坡、崩塌等影响因素已成为众多学者的研究热点<sup>[7-9]</sup>。杨吉山等<sup>[8]</sup>通过实地观测数据,讨论分析沟道演变、坡度、植被和降雨等因素对崩塌、滑塌等失稳形式发育影响;牛全福等<sup>[9]</sup>针对黄土滑坡,利用敏感系数法、确定系数法和相关性分析法,研究坡度、坡向、地形起伏度等地形因子对黄土滑坡影响的适宜性,筛选出适用于研究区滑坡危险性评价的地形因子;高健健等<sup>[10]</sup>利用无人机技术,识别辛店沟流域重力侵蚀现状,简单统计分析重力侵蚀数量与高程、坡度、坡向和地表曲率等分布关系。然而,目前针对小型崩塌、滑塌等失稳体,限于数据精度和工作对象等原因,如何以流域为研究区展开失稳体的精确识别、分析不同类型的失稳体和坡体稳定性主控因素的研究不足。

鉴于此,本文以无人机高精度遥感数据(分辨率 0.068 m)和 DEM(分辨率 0.34 m)数据,提取纸坊沟流域崩塌、滑塌、滑坡等失稳数据,采用统计学和敏感系数法,分析崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴等分布特征和影

响因子敏感性关系,探析各类型失稳体主控因子,量化影响因子对坡体失稳的敏感程度,以及各影响因子对坡体失稳发育的权重大小,从而进一步分析坡体失稳的主控因子,以期 为流域水土流失治理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

纸坊沟流域位于陕西省安塞区沿河湾镇,地理坐标为 109°13′46″—109°16′03″E, 36°46′28″—36°46′42″N。流域控制面积为 8.27 km<sup>2</sup>。该区属暖温带半干旱气候区,年均气温 8.9 ℃,年日照总时间为 2 145 h。年均降水量 549.1 mm,年内降雨主要分布 7—9 月,多以暴雨形式为主。地貌属典型黄土丘陵地貌,受构造运动和现代侵蚀作用的影响,流域内冲沟、切沟、陷穴等沟谷发育,大部分沟谷基岩裸露。自上个世纪 80 年代以来,流域内综合治理和退耕还林等工程的实施,生态环境和水土流失状况得到明显改善。植被主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom)、狼牙刺(*Sophora davidii* (Franch.) Skeels)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb)等。

### 1.2 数据来源

本研究主要使用数据包括正射遥感影像、DEM 数据、失稳体数据等多个数据集。(1)正射影像数据和 DEM 数据,以 2018 年 8 月利用 Ebee Plus PPK 测绘无人机拍摄航拍影像为数据源(空间分辨率 0.068 m),其飞行参数设置为:纵向重叠率设置为 85%,横向重叠率 80%,采用 Pix4Dmapper 软件对拍摄照片进行处理,获取正射遥感影像和 DEM 数据(空间分辨率 0.34 m)。地理坐标采用 WG84,投影坐标为高斯—克吕格。(2)失稳体数据,主要通过 Arcgis 10.2 平台,借助高精度正射遥感影像,采用遥感目视解译方法,结合 2018 年 4、8 月的详实野外调查和验证结果,获得本研究所采用的失稳体数据。依据实地调查情况,结合已有研究<sup>[6,11]</sup>,研究区内失稳形式主要为崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴 5 种类型,其中脱落,主要是指草皮层,在冻融、水力、干湿交替等作用下,导致组成地表的草皮或者是土壤,发生位移的现象。

### 1.3 影响因子的选取与提取

1.3.1 影响因子选取 坡体稳定性是受多种因素的影

响,纸坊沟流域由于特殊的气候、地形地貌、土地利用,坡体失稳现象普遍存在。因此,综合考虑流域实际状况和前人研究成果,本研究选择土壤母质、土地利用、地貌部位、坡度、坡向、地形起伏度 6 个影响因子,分析其与崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴失稳体的关系。

土壤母质的差异通过影响土壤入渗、土壤含水量、容重、内外摩擦角等方面,以改变坡体的稳定性<sup>[12-13]</sup>。土壤母质是坡体发生失稳的主体,不同类型的土壤母质,其土壤可蚀性和抗蚀性存在差别,同一条件下,土壤抗蚀性越大,坡体抵抗外部影响因素的能力越强,促使坡体失稳概率越低。

土地利用变化可引起侵蚀的其他因素变化,如植被类型、地表覆盖等,从而导致土壤侵蚀的方式和强度等不同。土地利用方式不同,应对外界因素对坡体侵蚀强度不同,进而对坡体稳定性产生影响。

黄土丘陵沟壑区特殊的地貌条件为坡体失稳发育创造了空间条件,据相关研究<sup>[14]</sup>发现,沟坡是黄土丘陵沟壑区水土流失最为活跃的地貌部位。地貌演变过程中,梁峁坡和沟坡是黄土丘陵沟壑地区主要的地貌部位,而地貌部位的差异对侵蚀方式产生影响。

坡度被认为是引起坡度失稳主要因子,坡度通过改变坡体应力的分布状况,对坡体稳定性产生作用<sup>[15]</sup>。

坡向是进行坡体敏感分析中不可忽略的重要影响因子。坡体的方位不同,影响坡体的水分、温度、植被覆盖、土壤侵蚀等过程<sup>[16-17]</sup>。

地形起伏度。高程值反映大范围的高程变化情况,而不能反映小尺度地形的高低起伏程度,但在实际中,纸坊沟流域发生的失稳大多是小规模浅层的。因此,为了准确衡量高度对失稳体的影响,度量小尺度高程的相对变化,本文引入地形起伏度的概念。地形起伏度指某一特定区域内,海拔最大值与最小值的差值<sup>[18]</sup>。

1.3.2 影响因子提取 土壤母质、土地利用和地貌部位,主要通过高精度遥感影像数据,并结合 2018 年 4、8 月的 2 次野外调查,利用 Arcgis 10.2 平台对研究区进行数据提取。地形因子,以空间分辨率 0.34 m DEM 为数据源,通过 Arcgis 10.2 软件,提取坡度、坡向、地形起伏度 3 个地形因子(图 1)。

地形起伏度(RF)计算公式为:

$$RF = H_{\max} - H_{\min}$$

式中: $H_{\max}$  和  $H_{\min}$  分别为 DEM 高程邻域统计最大值与最小值。

1.4 影响因子敏感系数与权重计算

用敏感系数来定量描述影响因子对崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴等失稳体的敏感性。原理主要是利

用统计学的方法,计算各影响因子的各二级分类下发生失稳的概率<sup>[9]</sup>。采用敏感性系数法对研究区失稳体影响因子的内部敏感性和各因子之间敏感性分析,能客观定量反映出影响因子对坡体失稳发育的敏感程度<sup>[19]</sup>。相应的敏感系数计算步骤为:

(1)计算参评因子  $m$  中各分级  $n$  栅格比例

$$P_{mn} = S_{mn} / S_{\text{研究区}}$$

式中: $P_{mn}$ 为分级栅格比例; $S_{mn}$ 为分级栅格数; $S_{\text{研究区}}$ 为研究区总栅格数。

(2)计算参评因子  $m$  中各分级  $n$  中失稳体发生频率

$$P_{AC} = S_{AC} / S_C$$

式中: $P_{AC}$ 为失稳发生频率; $S_{AC}$ 为分级中失稳栅格数; $S_C$ 为各失稳总栅格数。

(3)计算出参评因子的各分级敏感系数  $SI_C$

$$SI_C = P_{AC} / P_{mn}$$

(4)将计算获取的  $SI_C$  求算术平均值,即为参评因子的敏感系数  $SI$ 。一般认为,数值 $>1$ ,表示该因子对失稳体发育具有促进作用;数值 $<1$ ,表示该因子对失稳发育无关。

(5)归一化权重值

$$W = SI_i / \sum_i SI_i$$

式中: $SI$  为因子平均敏感系数; $N$  为  $SI > 1$  的因子个数; $i = 1, 2, \dots, N$ 。

2 结果与分析

2.1 失稳体空间分布特征及规模

结合高分辨率遥感影像,通过遥感解译和详实野外调查,纸坊沟流域失稳类型主要为崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴五大类,发育点为 15 493 处,面积为 0.44 km<sup>2</sup>,占流域总面积 5.39%,空间分布位置见图 2。其中崩塌为 1 285 处、面积为 0.069 km<sup>2</sup>,滑塌 2 594 处、面积 0.103 km<sup>2</sup>,滑坡 109 处、面积为 0.013 km<sup>2</sup>,脱落为 11 034 处、面积为 0.245 km<sup>2</sup>,陷穴 471 处、面积为 0.016 km<sup>2</sup>(表 1)。考虑本研究对象为小型浅层失稳体,且遥感影像分辨率为 6.8 cm,脱落与其他 4 类相比,是以片状分布,表现出发生数量要远高于其余 4 类。从发育面积来说,纸坊沟流域坡体失稳形式主要为脱落、滑塌和崩塌,3 类失稳体面积占到总失稳体面积的 93.18%。空间分布状况来看,流域北部和南部是失稳体分布主要区域,沟道是失稳体发生的主要分布位置。

2.2 失稳体与影响因子的关系

根据敏感系数计算方法和公式,结合统计学,选取土壤母质、土地利用、地貌部位、坡度、坡向和地形起伏度等因子来分析不同类型失稳体的空间分布格

局和敏感程度。进一步分析各影响因子对坡体稳定性的影响程度。

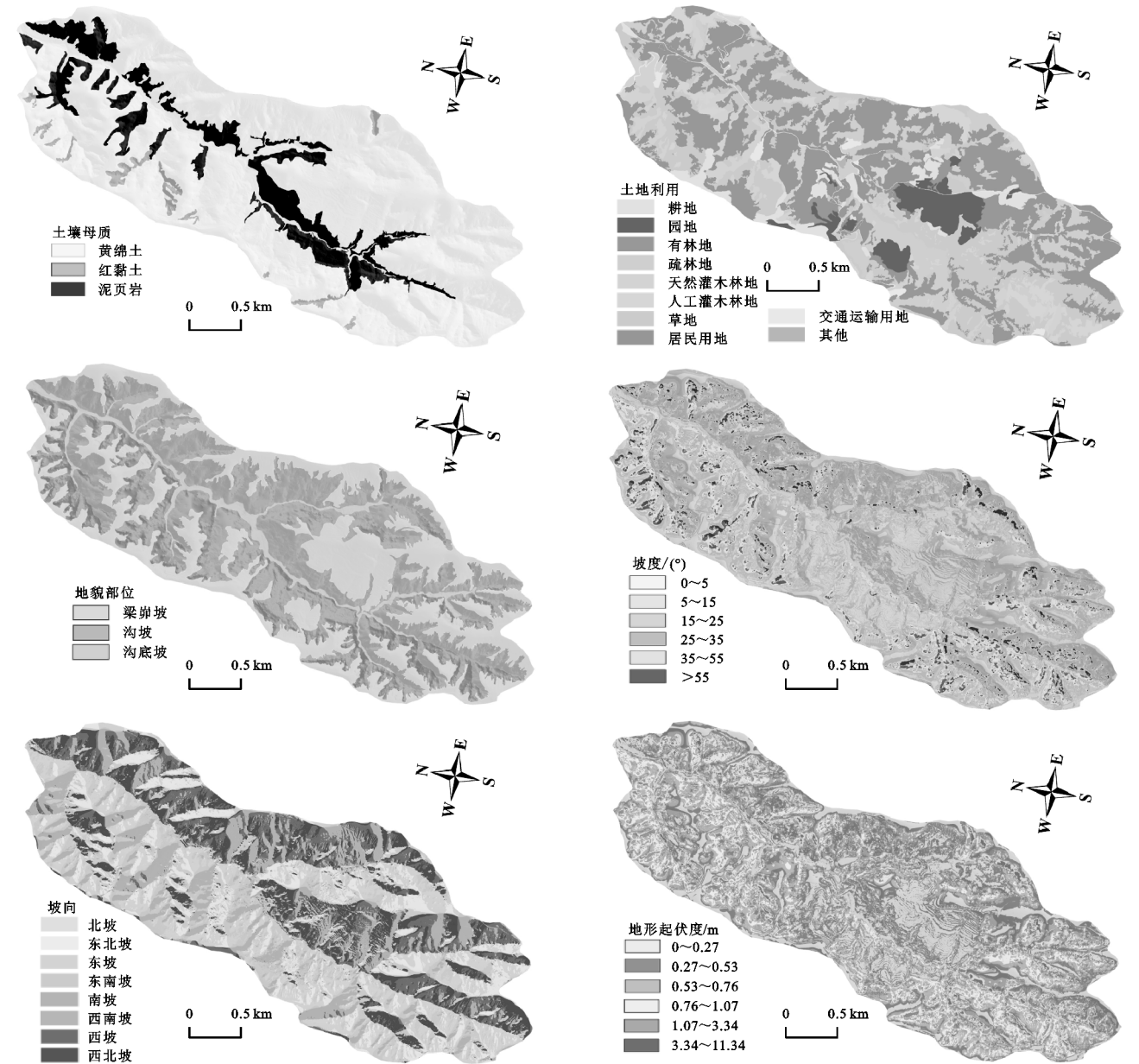


图 1 影响因子分级

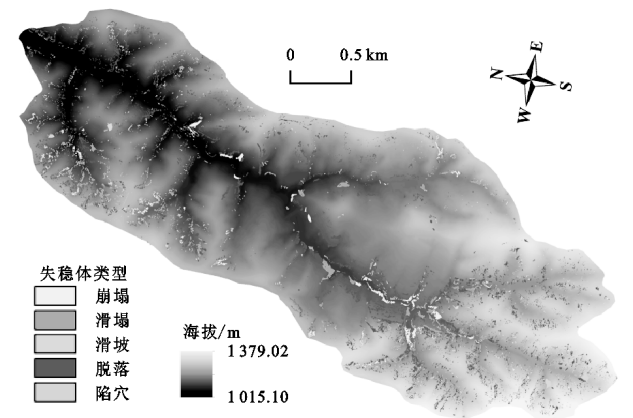


图 2 不同失稳类型空间分布

2.2.1 失稳体与土壤母质 土壤母质/土壤是组成坡体的物质基础,土壤母质的特性对坡体稳定和失稳发育类型起控制作用。通过野外实地调查,纸坊沟流

域土壤母质主要为黄绵土、红黏土和泥页岩 3 类。由图 3 可知,以流域失稳体而言,主要分布黄绵土和泥页岩,面积比例分别为 52.28%,39.59%,促进失稳体发育的主要土壤母质是红黏土、泥页岩,敏感系数分别为 3.86,3.35。

表 1 失稳体规模基本参数

| 失稳类型 | 数量/处  | 总面积/km <sup>2</sup> | 数量比例/% | 面积比例/% | 占流域总面积比例/% |
|------|-------|---------------------|--------|--------|------------|
| 崩塌   | 1285  | 0.069               | 8.29   | 15.91  | 0.83       |
| 滑塌   | 2594  | 0.103               | 16.75  | 22.73  | 1.25       |
| 滑坡   | 109   | 0.013               | 0.70   | 2.27   | 0.16       |
| 脱落   | 11034 | 0.245               | 71.22  | 54.54  | 2.96       |
| 陷穴   | 471   | 0.016               | 3.04   | 4.55   | 0.19       |
| 失稳体  | 15493 | 0.446               | 100.00 | 100.00 | 5.39       |

注:失稳体是崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴的总称。下同。

不同类型的失稳体分布于土壤母质的规律呈现出差异。除崩塌外,黄绵土是各类失稳体主要分布土壤母质,以滑坡为例,97.87%滑坡分布于黄绵土。由图 3 可知,47.76%的崩塌、37.91%的滑塌、42.35%的脱落主要分布于泥页岩。相对来说,红黏土分布的失稳体面积较少。分析土壤母质对各类型失稳体的敏

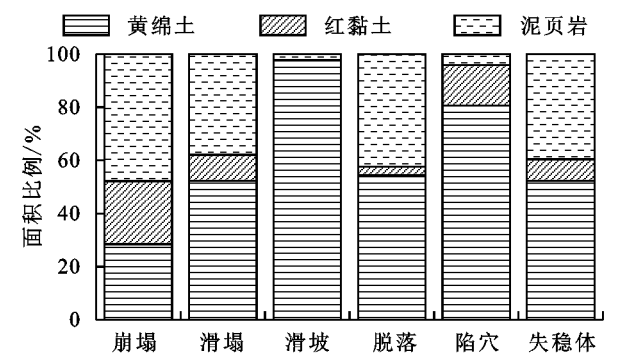


图 3 失稳体与土壤母质

2.2.2 失稳体与土地利用 流域主要土地利用划分为耕地、园地、有林地、疏林地、天然灌木林地、人工灌木林地和草地。土地利用/覆盖的不同,体现出坡体遭受侵蚀的强度差异。一般来说,植被稀疏、地表覆盖度低的坡体,缺乏植被对坡体的护坡和固坡作用,受到如降雨等外界因素直接侵蚀,坡体土壤侵蚀状况严重,极易发生滑塌、崩塌等坡体失稳现象。由图 4 可知,失稳体主要分布于草地和天然灌木林地,分别占失稳体总面积的 52.82%,31.08%。同时,对应的敏感系数均>1,反映 2 类土地利用是促进失稳发育的主要土地利用。

分析崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴的土地利用分布状况,草地是其主要分布面积比例最高的土地利

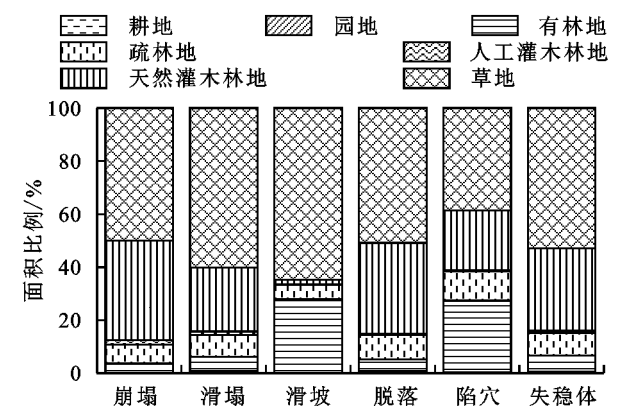
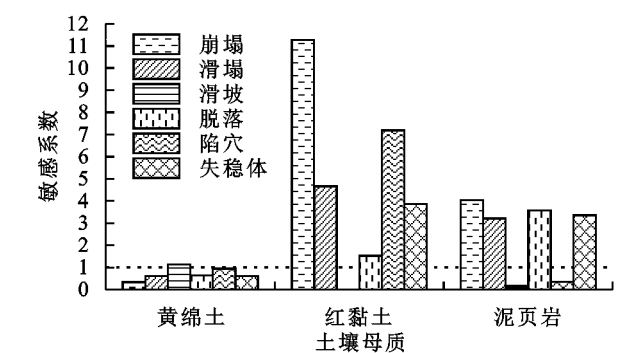


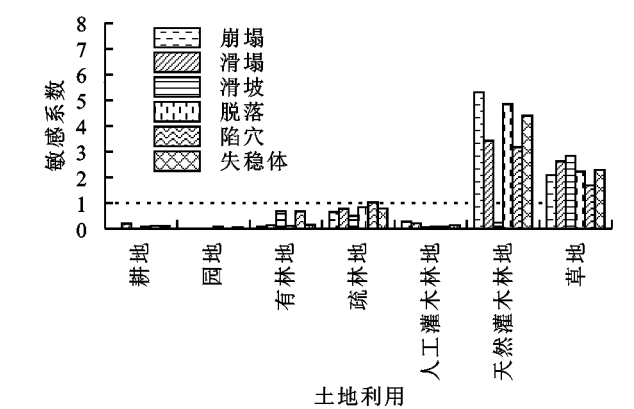
图 4 失稳体与土地利用

2.2.3 失稳体与地貌部位 流域内地貌部位可划分为梁峁坡、沟坡、沟底地。由图 5 可知,90%以上的失稳体分布于沟沿线以下的沟坡部位,对于崩塌、滑塌、滑坡和陷穴而言,沟坡分布面积比例均>93%,尽管脱落是 5 类失稳体分布面积比例最低的失稳类型,但分布面积比例也达到 86.54%,体现出失稳体在地貌部位的分布具有聚集程度。说明沟坡是发生坡体失稳的主要地貌部位,也是今后水土流失治理的

感系数,引发崩塌、滑塌、脱落的发育土壤母质为红黏土、泥页岩,陷穴为红黏土。可见,不同类型的土壤母质对坡体失稳发育类型产生重要影响。产生这种差异性,主要原因在于红黏土、泥页岩与表层的土壤组成坡体存在大量裂隙、垂直节理,为坡体失稳发育创造一定空间条件。



用。据野外调查结果分析,流域草地主要为天然草地,人工种植草地较少,且草地群落植被丰富度和盖度较低,通过对流域 12 个草本群落调查,草地盖度范围为 57.70%~15.00%,存在 7 个植被群落处于低覆盖度水平(<30%)<sup>[20]</sup>。从不同土地利用角度来分析(图 4),草地对所涉及 5 种失稳体的敏感性系数均>1,滑塌、滑坡、脱落和陷穴敏感系数值维持 2.5~3.5,崩塌敏感性系数刚刚>1,反映出草地对 5 类失稳体发育促进作用顺序为滑坡>陷穴>滑塌>脱落>崩塌。天然灌木林地,对崩塌、滑塌、脱落和陷穴的敏感程度均>1,滑坡敏感性<1,敏感系数分别为 5.31,3.42,4.85,3.17,其表现出对崩塌的发育最为敏感。



重点区域。统计不同地貌部位对崩塌、滑塌等失稳体的敏感系数,由图 5 可知,沟坡对所涉及的失稳体,敏感系数均为>1,但彼此间的敏感系数差别不大,其中对崩塌敏感系数最高,为 1.64,敏感性最低的脱落,敏感系数为 1.48。与梁峁坡相比,主要原因在于沟坡立地条件差、地形破碎度大且坡度陡,植被稀疏,多存在浅沟和冲沟,为坡体失稳发育创造了空间条件<sup>[21]</sup>。

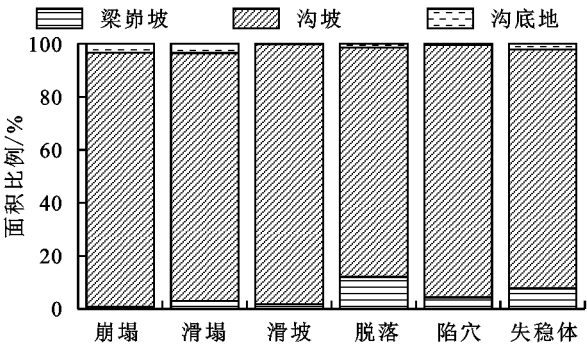
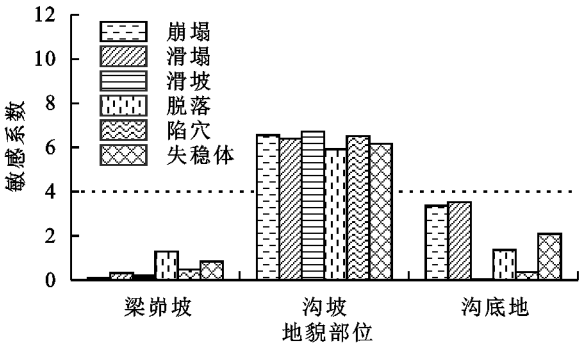


图 5 失稳体与地貌部位



2.2.4 失稳体与坡度 坡体稳定性与坡度大小存在反比关系。由图 6 可知,流域的所有失稳体坡度主要分布在 $>25^{\circ}$ ,集中分布于 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 。对于崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴不同类型失稳体,变化趋势与整体失稳体分布规律一致。坡度对整个坡体失稳体的敏感系数,随着坡度增大而增大,敏感系数最大坡度区间为 $>55^{\circ}$ ,敏感系数为 3.56。坡度对于崩塌、滑塌、滑坡、脱落、和陷穴的敏感系数,与坡度对整体失稳敏感系数趋势存在一致性,且引起各类失稳体促进作用的坡度分布范围均为 $>35^{\circ}$ ,这与坡体组

成物质最大休止角为 $35^{\circ}$ 左右存在一定关联。分析发现,越陡的坡体促进崩塌的发育作用要高于滑塌和滑坡。以 $>55^{\circ}$ 坡体为例,崩塌的敏感系数为 5.58,是所有失稳体敏感系数最大。而滑塌和滑坡分别 4.31,4.20。脱落在促进其发育的坡度区间,敏感系数差别不大,反映出坡度对脱落发育作用相比其余 4 类失稳体的作用小。陷穴这类负地形失稳体来说,坡度越大对其发育的敏感程度越高, $>55^{\circ}$ 是陷穴最为敏感的发育坡度,这与形成的陷穴存在垂直节理有关。

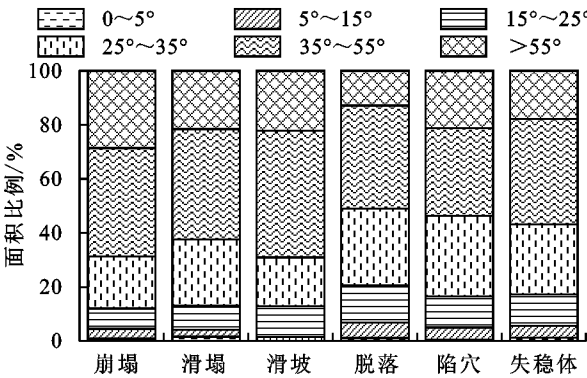
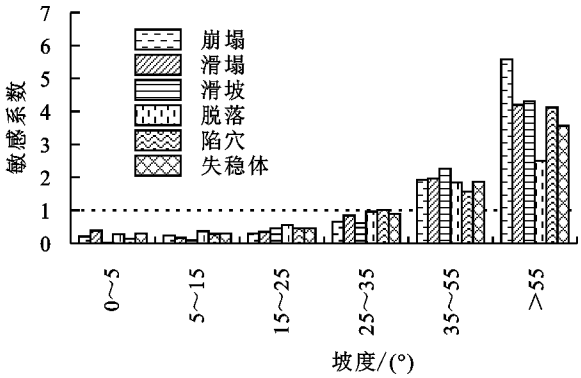


图 6 失稳体与坡度



2.2.5 失稳体与坡向 统计分析不同类型失稳在坡向因子分布,由图 7 可知,失稳体主要分布于流域的东坡、东南坡和西坡,分布面积比例为 17.15%,14.68%,15.38%。对于不同类型失稳体坡向分布状况可知,崩塌、滑塌、脱落和陷穴,主要分布坡向是东坡、东南坡,但各坡向分布面积比例基本差别不大。然而,滑坡主要分布坡向为北坡和西北坡,两坡向分布面积占到滑坡总面积的 69.20%。说明滑坡坡向分布与其余 4 类坡向分布存在明显的差异。

由图 7 可知,对崩塌产生促进作用是东南坡、南坡和西南坡,相应的敏感系数为 1.22,1.77,1.53,其中南坡对崩塌发育最为敏感,但彼此间敏感性系数差别不大。滑塌敏感坡向为东坡、东南坡、南坡和西南坡,最敏感坡向为东南坡;敏感系数分别为 1.10,1.47,1.38,1.12。滑坡敏感坡向为北坡、西北坡,敏感系数为 2.39 和 3.12,最敏感坡向为西北坡。分析崩

塌、滑塌和滑坡 3 类失稳体敏感性坡向可知,依据阴阳坡划分,可知崩塌、滑塌主要坡向为阳坡,滑坡为阴坡。阴阳坡向类型划分,主要考虑到温度和水分,普遍认为阴坡相比阳坡水分作用强,阳坡比阴坡温度效果强。侧面反映崩塌和滑塌主要受温度作用,滑坡受水分作用。脱落,敏感系数 $>1$ 的坡向包括东南坡、南坡、西南坡和西坡,其中最为敏感坡向为南坡,但各坡向对脱落发育的敏感性程度差异较小。陷穴该类失稳体,敏感系数 $>1$ 的坡向包括:东北坡、东坡、南坡、西南坡,但 4 个坡向的敏感性大小差别不大,敏感系数为 1.23,1.24,1.27,1.22。坡向对整体坡体失稳的敏感系数,促进其失稳的坡向为东南坡、南坡和西坡,敏感系数为 1.33,1.59,1.31,南坡是坡体失稳的主要坡向。与 Qiu 等<sup>[17]</sup>研究黄土地区的滑坡认为,南坡是引发滑坡灾害的主要分布坡向的结论一致。

2.2.6 失稳体与地形起伏度 地形起伏度不同,导

致坡体势能差异,影响坡体的稳定性。由图 8 可知,不论所有失稳体,还是崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴,失稳体主要集中分布于起伏度 $<4$  m。其中地形起伏度分布比例最高的范围为 0.76~1.07 m。地形高差虽然没有改变坡体应力分布状态,但控制着坡

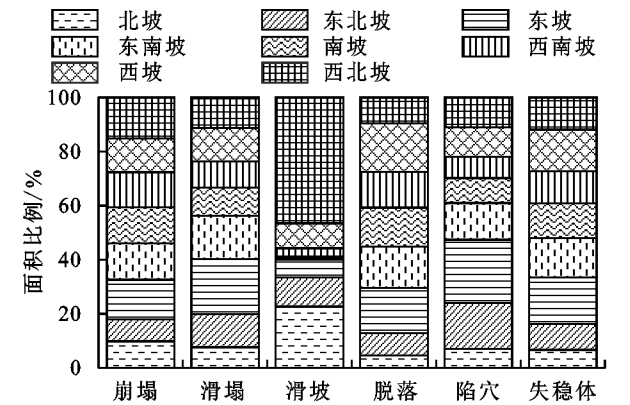


图 7 失稳体与坡向

地形起伏度对不同类型失稳体敏感程度的促进作用差异明显。崩塌,当起伏度 $>0.76$  m,易于崩塌发育。当地形起伏度 $>3.34$  m 时,敏感程度降低,但仍起到促进作用。滑塌、滑坡和脱落 3 类失稳体,促进其发育的地形起伏度范围为 0.76~3.34 m,敏感系

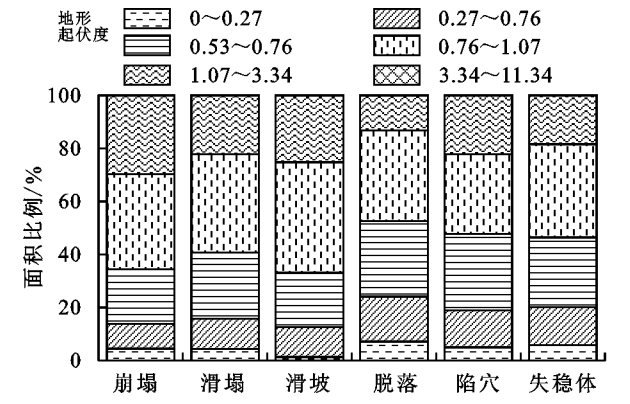


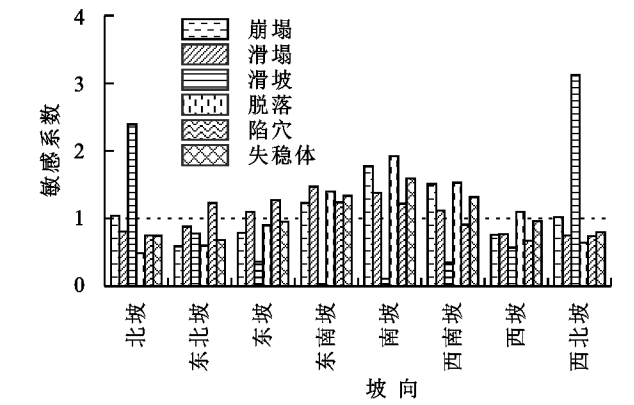
图 8 失稳体与地形起伏度

2.3 坡体稳定性主要影响因子分析

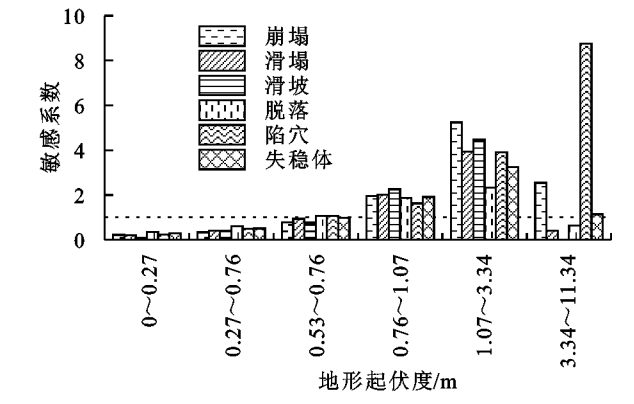
通过计算影响因子的平均敏感系数,由表 2 可知,对于整个流域失稳体而言,引起其失稳的主要因子为土壤母质、土地利用、坡度、坡向和地形起伏度,其中土壤母质是促进失稳发育最为敏感的影响因子,敏感系数可以达到 2.61,归一化权重值达到 0.32。反映小型浅层失稳体的研究中,土壤母质是不可忽略的影响因子。同时,确定引起坡体失稳主控因子还包括地形起伏度、坡度、土地利用、坡向和地貌部位。

不同类型的失稳体受到发育的特征不同,影响因素对其发育的作用效果存在差异。首先,敏感性因子的不同。由表 2 可知,引起崩塌、滑塌和脱落发育的影响因子为土壤母质、土地利用、坡度、坡向、地形起伏度。滑坡的敏感性因子为坡度和地形起

体各处应力大小。随着起伏度增大,坡体应力呈线性增加。对坡体失稳敏感的地形起伏度范围为 0.76~11.34 m,但是当高差 $>3.34$  m,敏感系数呈现下降趋势,反映小型浅层失稳体,地形起伏度超过一定阈值,坡体失稳概率降低。



数基本随着地形起伏度增大而增大,当地形起伏度 $>3.34$  m 时,地形起伏度对其发育无促进作用。陷穴,地形起伏度敏感范围为 0.76~11.34 m,敏感系数基本随着地形起伏度增大而增大,最敏感地形起伏度范围为 3.34~11.34 m。



度,对应敏感系数为 1.29 和 1.32。陷穴的影响因子为土壤母质、坡度、坡向和地形起伏度。其次,促进坡体失稳发育的主导因子不一,且各因子对坡体发育类型作用效果存在较大差异。由表 3 可知,崩塌、滑塌和脱落主控因子为土壤母质、地形起伏度、坡度、土地利用、坡向,其中土壤母质权重分别为 0.45, 0.34, 0.27,反映出土壤母质在坡体失稳发育过程中起主要作用。滑坡发育的主导因子为坡度和地形起伏度,两者权重差值不大,说明针对小型滑坡发育评价中坡度和地形起伏度是不可忽略的影响因子。同时,促进陷穴发育的影响因子为土壤母质、地形起伏度、坡度和坡向,对应的权重分别为 0.36, 0.34, 0.16, 0.13。可见,陷穴发育的主要影响因子为土壤母质和地形起伏度。

表 2 各影响因子平均敏感系数

| 类型  | 土壤<br>母质 | 土地<br>利用 | 地貌<br>部位 | 坡度   | 坡向   | 地形<br>起伏度 |
|-----|----------|----------|----------|------|------|-----------|
| 崩塌  | 5.21     | 1.20     | 0.83     | 1.49 | 1.09 | 1.84      |
| 滑塌  | 2.83     | 1.05     | 0.85     | 1.32 | 1.04 | 1.31      |
| 滑坡  | 0.44     | 0.62     | 0.58     | 1.29 | 0.96 | 1.32      |
| 脱落  | 1.91     | 1.18     | 0.71     | 1.08 | 1.07 | 1.14      |
| 陷穴  | 2.83     | 0.96     | 0.61     | 1.27 | 1.00 | 2.68      |
| 失稳体 | 2.61     | 1.13     | 0.76     | 1.23 | 1.05 | 1.34      |

表 3 各影响因子归一化权重

| 类型  | 土壤<br>母质 | 土地<br>利用 | 地貌<br>部位 | 坡度   | 坡向   | 地形<br>起伏度 |
|-----|----------|----------|----------|------|------|-----------|
| 崩塌  | 0.45     | 0.10     | 0.07     | 0.13 | 0.09 | 0.16      |
| 滑塌  | 0.34     | 0.13     | 0.10     | 0.16 | 0.12 | 0.16      |
| 滑坡  | —        | —        | —        | 0.49 | —    | 0.51      |
| 脱落  | 0.27     | 0.17     | 0.10     | 0.15 | 0.15 | 0.16      |
| 陷穴  | 0.36     | —        | —        | 0.16 | 0.13 | 0.34      |
| 失稳体 | 0.32     | 0.14     | 0.09     | 0.15 | 0.13 | 0.17      |

3 讨论

由于地形破碎、风化侵蚀严重等原因,黄土丘陵沟壑区是发生小型坡体失稳的主要区域。目前,针对黄土丘陵沟壑区的不同类型失稳体空间分布状况和影响因素,已获取不少研究成果。袁湘秦等<sup>[22]</sup>对绥德县的地质灾害易发性评价过程中,选取坡度、坡高等 7 个指标,坡度权重为 0.2,坡向权重为 0.05。余璐等<sup>[23]</sup>采用 RIRA 法分析各影响因素对延安市宝塔区内的崩塌、滑坡及整个重力侵蚀的敏感程度。其中,坡度对崩塌敏感系数为 89.3,滑坡敏感系数为 1 616.6,重力侵蚀敏感系数为 60.5,可以反映出坡度对于坡体失稳的发育起主要作用,结论与本文基本一致。然而,坡度及其他影响因素促进坡体失稳的重要程度,与相关研究存在一定差别,主要原因有:其一,研究对象的差别,本文从崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴 5 个类型角度分析引起坡体失稳的主要影响因素,相关研究主要是以崩塌、笼统概念上的滑坡为研究对象;其二,研究规模的差异,本文主要针对是小规模和浅层的失稳体,相关研究是以大流域、县域、区域等的大规模崩塌、滑坡等地质灾害为研究对象;其三,考虑到研究区实地状况、数据获取程度及研究目的不同,选取的影响因素存在差别,故而获取的相关结论有所不同。

总体来说,本研究尝试利用高精度遥感影像、大比例尺 DEM 数据分析不同类型失稳体发育的主控因素。在失稳体获取和影响因素提取过程中,应用无人机作为技术手段进行失稳体的研究,获得了可靠的

结果。说明无人技术和高分辨率的遥感影像实施坡体失稳的研究是可行的。同时,不同类型区域崩塌、滑塌等失稳体规模和发育点在空间分布格局存在差异,并在各影响因子区间表现为不同程度的敏感性。因此,进行区域坡体稳定性评价过程中应充分考虑上述规律和当地实地状况,以期获取的结果更具有可靠性和科学性。

4 结论

(1)流域内坡体失稳类型是以脱落、滑塌和崩塌为主,脱落分布特征多以片状形式,规模多以小型和浅层为主。

(2)不同类型失稳体空间分布格局呈现出差异性和相似性。相似性表现在以地貌部位分布失稳体为例,崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴等失稳体主要分布于沟坡,且分布面积比例均很高,脱落是分布沟坡面积比例最低的失稳类型,但也有 86.54%的脱落发生于沟坡之上。差异性体现在以土壤母质为例,崩塌、滑塌、滑坡、脱落和陷穴分布面积比例存在差异性,滑坡主要发生于黄绵土,面积比例达到 97.87%,脱落发育主要土壤母质为黄绵土和泥页岩,占比分别为 54.45%和 42.35%。

(3)在各评价因子内部敏感性表明,土壤母质中泥页岩和红黏土、土地利用下的天然灌木林地和草地、地貌部位中的沟坡、坡度>35°、坡向为东南坡,南坡和西南坡、地形起伏度为 0.74~11.34 m 是坡体失稳发生的高敏感区域。

(4)在本文所考虑影响因素中,影响坡体稳定性敏感权重由大到小因子为土壤母质>地形起伏度>坡度>土地利用>坡向。崩塌、滑塌和脱落主控影响因子为土壤母质、地形起伏度和坡度,滑塌主控因子为坡度和地形起伏度,陷穴主控因子为土壤母质和地形起伏度。综合评价,今后进行坡体稳定性评价过程中土壤母质、地形起伏度和坡度是不可忽略的影响因子。

参考文献:

[1] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic eco-system responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2016, 45(1): 223-243.

[2] 刘国彬,王兵,卫伟,等.黄土高原水土流失综合治理技术及示范[J].生态学报,2016,36(22):7074-7077.

[3] 曹文洪,张晓明.新时期黄河流域水土保持与生态保护的战略思考[J].中国水土保持,2020(9):39-42.

[4] 党小虎,吴彦斌,刘国彬,等.生态建设 15 年黄土高原生态足迹时空变化[J].地理研究,2018,37(4):761-771.

[12] 张瑾.旅游干扰对重庆市黄水国家森林公园枯落物及土壤蓄水能力的影响[J].水土保持通报,2020,40(6):29-35.

[13] 王东丽,郝可欣,梁潇洒,等.干扰对固沙樟子松林凋落物特征及持水性的影响[J].浙江农林大学学报,2019,36(6):1125-1133.

[14] 杜雪,王海燕,耿琦,等.云冷杉针阔混交林枯落物持水性能[J].水土保持学报,2021,35(2):361-368.

[15] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].生态学杂志,2019,38(9):2662-2670.

[16] 赵鹏,马佳明,李艳茹,等.太行山典型区域不同林分类型枯落物水文效应[J].水土保持学报,2020,34(5):176-185.

[17] 马佳明,赵鹏,刘雪莹,等.崇陵流域不同林分类型枯落物水文效应研究[J].生态环境学报,2021,30(4):691-699.

[18] 杨寒月,张光辉,张宝军.黄土丘陵区沟坡典型植物群落枯落物蓄积量及其持水性能[J].中国水土保持科学,2019,17(3):83-90.

[19] 冯楷斌,张暘暘,郭敬丽,等.冀北山地不同类型白桦林枯落物及土壤持水性能研究[J].林业资源管理,2016(2):74-80.

[20] 胡晓聪,黄乾亮,金亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.

[21] 刘斌,鲁绍伟,李少宁,等.北京西山 6 种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2015,29(4):73-78,137.

[22] 马晓至,毕华兴,王珊珊,等.晋西黄土区典型林分枯落物层水文生态特性研究[J].水土保持学报,2020,34(6):77-83,88.

[23] 张佳楠,张建军,张海博,等.晋西黄土区典型林分水源涵养能力评价[J].北京林业大学学报,2019,41(8):105-114.

(上接第 114 页)

[5] 赵超,王书芳,徐向舟,等.重力侵蚀黄土沟壑区沟坡产沙特性[J].农业工程学报,2012,28(12):140-145.

[6] 曹银真.黄土地区重力侵蚀的类型和成因[J].中国水土保持,1985(6):8-13.

[7] 王俊豪,魏云杰,梅傲霜,等.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,2021,48(2):388-401.

[8] 杨吉山,姚文艺,马三保,等.黄土高原沟壑区小型重力侵蚀影响因素分析[J].水土保持研究,2010,17(6):5-8.

[9] 牛全福,冯尊斌,党星海,等.黄土区滑坡研究中地形因子的选取与适宜性分析[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1584-1592.

[10] 高健健,艾琦森,郝鲁东,等.基于无人机技术的重力侵蚀影响因素研究[J].人民黄河,2020,42(10):100-103.

[11] 郑书彦.重力侵蚀分类研究[J].水土保持研究,2008,15(5):46-48.

[12] Guo W Z, Xu X Z, Zhu T X, et al. Changes in particle size distribution of suspended sediment affected by gravity erosion: A field study on steep loess slopes [J].Journal of Soils and Sediments,2019,20(2):1730-1741.

[13] 唐川.云南怒江流域泥石流敏感性空间分析[J].地理研究,2004,24(2):177-185.

[14] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域沟坡水热条件及其生态修复初探[J].自然资源学报,2004,19(2):183-189.

[15] 段钊,赵法锁,陈新建.陕北黄土高原区崩塌发育类型及影响因素分析:以吴起县为例[J].自然灾害学报,2012,21(6):142-149.

[16] 林超,李昌文.阴阳坡在山地地理研究中的意义[J].地理学报,1985,40(1):20-27.

[17] Qiu H J, Regmi A D, Cui P, et al. Slope aspect effects of loess slides and its spatial differentiation in different geomorphologic types [J].Arabian Journal of Geosciences,2017,10(15):e344.

[18] 汤国安,李发源,刘学军.数字高程模型教程[M].3 版.北京:科学出版社,2016.

[19] 吴森,李虎杰,陈国辉,等.基于贡献率权重法的区域滑坡影响因子敏感性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):26-31.

[20] 杨寒月,张光辉,张宝军.黄土丘陵沟壑区沟坡典型植物群落生长特征[J].水土保持研究,2019,26(2):62-68.

[21] 赵兴阳,徐向舟,蒋云钟,等.暴雨条件下植被对黄土沟坡重力侵蚀的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):58-63.

[22] 袁湘秦,赵法锁,陈新建,等.陕西省绥德县地质灾害易发性区划[J].灾害学,2017,32(1):117-120,125.

[23] 余璐,徐向舟,张茂省,等.黄土高原重力侵蚀对地貌因素的敏感性分析[J].水土保持学报,2019,33(4):119-125.