

黄土丘陵沟壑区浅层滑坡和崩塌形态特征与发育临界地形

邢书昆¹, 张光辉^{1,2}, 王滋贯¹, 王丽丽¹

(1.北京师范大学地理科学学部,北京 100875;2.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)

摘要: 退耕还林(草)工程的深入实施有效遏制了黄土高原水土流失,但以浅层滑坡和崩塌为主的重力侵蚀在黄土高原广泛分布,且已成为小流域侵蚀泥沙主要来源之一。为探究黄土丘陵沟壑区浅层滑坡和崩塌的形态特征和发育临界地形,在陕西省安塞区纸坊沟小流域调查了 53 处浅层滑坡和 40 处崩塌,记录其植被特征,同时进行无人机摄影测量。结果表明:浅层滑坡的规模通常大于崩塌,且形态变化范围更大;浅层滑坡长度、宽度、周长和面积与沟壑密度呈显著负相关($P < 0.01$),与距离沟道远近呈显著正相关($P < 0.01$),崩塌的形态特征与沟壑密度和距离沟道远近的相关性较弱;浅层滑坡和崩塌均较为集中地分布在坡度和地形湿度指数适中($30^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 和 $0.50 \sim 2.00$)、径流流路比降和径流流路长度较小($60.0\% \sim 120.0\%$ 和 $0 \sim 15.00$ m)的区域,而在坡度和径流流路比降较大($> 55^{\circ}$ 和 $> 120.0\%$)、地形湿度指数和径流流路长度较小(< 0.50 和 < 15.00 m)的区域,崩塌较为发育;反之,在坡度和径流流路比降较小($< 30^{\circ}$ 和 $< 120.0\%$)、地形湿度指数和径流流路长度较大(> 2.00 和 > 15.00 m)的区域,浅层滑坡较为发育;灌木坡面浅层滑坡和崩塌主要发生的坡向范围是 $0 \sim 180^{\circ}$,草本坡面浅层滑坡主要发生的坡向范围是 $0 \sim 90^{\circ}$ 和 $270^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。研究结果对于理解浅层滑坡和崩塌的发生过程和临界地形条件、估算小流域产沙量和控制侵蚀具有重要意义。

关键词: 黄土高原; 重力侵蚀; 地形因子; 临界条件; 植被类型

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)02-0106-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.02.014

Morphological Characteristics and Critical Topography of Shallow Landslide and Collapse in Hilly and Gully Region of the Loess Plateau

XING Shukun¹, ZHANG Guanghui^{1,2}, WANG Ziguan¹, WANG Lili¹

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. State Key

Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: The implementation of the "grain-for-green" project has effectively mitigated soil erosion of hill slope on the Loess Plateau. However, gravity erosion, including both shallow landslide and collapse, is widely distributed on the Loess Plateau and has become one of the dominant source of erosion sediment in small watershed. To explore the morphological characteristics and critical topography of shallow landslide and collapse in hilly and gully region of the Loess Plateau, 53 shallow landslides and 40 collapses were investigated in Zhifanggou small watershed in Ansai District, Shaanxi Province, and their vegetation characteristics were also recorded. Photogrammetry was performed by unmanaged aircraft vehicle. The results showed that the sizes of shallow landslide were usually larger than those of collapse. The variations in morphological characteristics of shallow landslide were greater than those of collapse. The length, width, perimeter and area of shallow landslide were negatively correlated with gully density ($P < 0.01$), and were positively correlated with the distance to gully system ($P < 0.01$). Nevertheless, the correlations between the morphological characteristics of collapse, and gully density and distance were loose. Shallow landslide and collapse were concentrated on where the slope and topographic wetness index ($30^{\circ} \sim 55^{\circ}$ and $0.50 \sim 2.00$) were moderate, flow path gradient and flow path length were small ($60.0\% \sim 120.0\%$ and $0 \sim 15.00$ m). Nevertheless, in areas where the slope and flow path gradient were large ($> 55^{\circ}$ and $> 120.0\%$), and the topographic

收稿日期:2021-09-17

资助项目:国家自然科学基金重点项目“黄土高原植被恢复影响切沟侵蚀的动力机制与模拟”(42130701)

第一作者:邢书昆(1996—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 201921051020@mail.bnu.edu.cn

通信作者:张光辉(1969—),男,甘肃静宁人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

wetness index and flow path length were small (<0.50 and <15.00 m), gravity erosion was dominated by collapse. On the contrary, in areas where the slope and flow path gradient were small ($<30^\circ$ and $<120.0\%$), and the topographic wetness index and flow path length were large (>2.00 and >15.00 m), gravity erosion was dominated by shallow landslide. Shallow landslide and collapse widely occurred on slopes covered by shrub communities with the aspect of $0\sim 180^\circ$. Shallow landslide was also distributed on slopes covered by herbs with the aspects of $0\sim 90^\circ$ and $270^\circ\sim 360^\circ$. The research results are helpful for understanding the occurrence process and critical topographic conditions of shallow landslide and collapse estimating sediment yield and controlling erosion in small watershed.

Keywords: the Loess Plateau; gravity erosion; topographic factor; critical condition; vegetation type

黄土丘陵沟壑区坡陡沟深,加之黄土质地疏松、富含大孔隙、透水湿陷性强、垂直节理发育等性质^[1-2],导致黄土丘陵沟壑区浅层滑坡和崩塌等重力侵蚀非常活跃^[3]。浅层滑坡是指土体在重力作用下沿一定的软弱面产生剪切破坏、整体顺坡向下滑移的现象,滑坡体长度和宽度多在数十米之内,厚度一般 <2 m^[3-5];崩塌是指土体在重力作用下发生的迅速、突然的位移,伴随土体的倾倒、滚落、翻转等现象,崩塌规模较小,土方量一般在数方至数十方^[3-4]。在黄土高原退耕还林(草)工程有效实施、植被显著恢复、坡面侵蚀得到有效遏制的大背景下,以浅层滑坡和崩塌为主的重力侵蚀已成为黄土高原小流域侵蚀泥沙主要来源之一^[6-7]。因此,研究黄土丘陵沟壑区浅层滑坡和崩塌形态特征,以及发育的临界地形条件,对理解重力侵蚀发育的动力过程、估算小流域侵蚀泥沙及其阻控具有重要意义^[6,8]。

在近几十年,国内外学者^[9-13]研究了浅层滑坡和崩塌的发生条件,除黄土本身的性质和降雨、地震等外部条件外,土体相对高度、坡度、径流分散和汇聚状况、坡向等地形因子以及植被特性是影响浅层滑坡和崩塌发生的重要因素。土体相对高度受沟壑密度和距离沟道远近的影响,决定着浅层滑坡和崩塌发育的空间范围,进而影响其大小和空间分布^[9-10];坡度决定坡体所受剪切力大小和有效临空面,控制着坡面水文连通性,从而影响土体土壤水分、抗剪强度和浅层滑坡与崩塌的大小^[9,11];径流分散和汇聚状况可用径流流路比降、径流流路长度、汇水面积、地形湿度指数等地形因子综合反映,直接影响土壤孔隙水压力,进而影响土体黏聚力和结构强度,如果壤中流在不同土层界面汇聚,则会起到润滑作用,促使软弱结构面形成,促进浅层滑坡和崩塌发育^[2,12];不同坡向的日照条件不同,引起植物群落和植被生长状况出现差异,导致土壤理化性质出现明显的差异,从而影响重力侵蚀^[1,13];植被对浅层滑坡和崩塌的影响可从力学效应和水文效应方面分析,但都具有正负的双重影响^[14-16]。发育临界地形是指浅层滑坡和崩塌

发生时对应的坡度等地形因子的上限或下限,是浅层滑坡或崩塌发生的必要地形条件。曹银真^[17]研究认为,黄土高原滑坡主要发生在坡度为 $35^\circ\sim 55^\circ$,沟谷相对高差较大的地方,而崩塌主要发生在坡度 $>55^\circ$ 的沟坡和冲沟沟头处;Li等^[18]研究发现,黄土滑坡(80%)通常发生在坡度 $>35^\circ$ 、坡高 >40 m的凹形坡,当坡度 $>50^\circ$ 时,重力侵蚀以崩塌为主,并且发现阳光照射少、土壤含水量高的沟道南岸滑坡数量大于北岸;尚慧等^[7]研究认为,宁夏彭阳县的滑坡集中分布在 $0\sim 135^\circ$ 和 $225^\circ\sim 360^\circ$ 的坡向范围,即在阴坡和半阴坡较为发育;Xu等^[12]通过室内模拟降雨和沟岸崩塌试验研究了降雨和地形条件对滑坡、崩塌和泥流的诱发机制,结果发现,滑坡和泥流与降雨特性密切相关,而崩塌则主要受坡度控制;Qiu等^[8]对陕西延安地区的滑坡进行了遥感解译和野外调查发现,滑坡体长度和面积随着土体相对高度呈幂函数增加,随坡度增大而减小,但滑坡发生频率的变化趋势则相反。

上述研究结果均说明地形因子显著影响浅层滑坡和崩塌的发育和形态特征,但目前系统比较二者形态特征和发育临界地形的研究较少,浅层滑坡和崩塌在坡度、径流分散和汇聚状况、坡向等发育地形条件的差异需要进一步明确。本文在黄土丘陵沟壑区典型小流域选择5条重力侵蚀显著发育的支沟,通过野外调查和无人机摄影测量获取高精度DEM(0.7 m分辨率),对53处浅层滑坡和40处崩塌的形态特征、地形因子以及植被覆盖因子进行对比分析,探究黄土丘陵沟壑区浅层滑坡和崩塌形态特征及发育条件的异同,明确二者规模大小、自相似特征和发育临界地形。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外踏查于2019年8—9月和2021年4—5月在陕西省安塞区纸坊沟小流域($36^\circ 46' 28''\sim 36^\circ 46' 42''$, $109^\circ 13' 46''\sim 109^\circ 16' 03''$)进行,该小流域地处暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡区域,年均气温 8.8°C ,年均降水量549 mm,季节分配极不均匀,7—9月的降水占年总降水量的70%以上,且多短历时暴

雨;流域内地形破碎,梁崮起伏,沟壑密度达 8.06 km/km²,属黄土高原丘陵沟壑区第二副区;流域海拔 1 038~1 414 m,梁崮顶与沟谷的相对高差多为 150~200 m;新构造运动活跃,且以上升为主,地层从上到下依次为厚层第四纪黄土、中生代第三纪红黏土和侏罗纪岩层;流域主要土壤类型为黄绵土,其黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 15.9%,61.7%和 22.3%,占流域面积的 65.5%,其次为红胶土和二色土,占流域面积的 21.5%;目前,流域内的植被主要

是人工栽植的乔木和灌木群落、自然恢复的灌木群落、草本群落和灌木与草本混交群落^[19-20]。经踏查,选择浅层滑坡和崩塌发育程度较高的 5 条支沟(BG1、BG2、BG3、BG4、BG5)作为具体研究区域,除 BG1 支沟位于小流域的中间部位、海拔相对较低、沟道底部有少量基岩出露外,其余 4 条支沟均靠近小流域南端分水岭,海拔较高,黄土层深厚。此次调查的浅层滑坡和崩塌均发生在沟坡黄土层内,各条支沟基本信息见表 1。

表 1 调查支沟基本信息

编号	平均 海拔/m	平均 坡度/(°)	坡向分布比例/%				面积/ hm ²	调查失稳体数量/个		
			0~90°	90°~180°	180°~270°	270°~360°		浅层滑坡	崩塌	总计
BG1	1156.7	29.1	19.6	41.2	17.6	21.6	12.7	14	14	28
BG2	1253.9	32.1	25.9	31.3	26.3	16.5	29.2	7	12	19
BG3	1278.0	32.4	37.2	27.9	7.6	27.3	29.3	8	5	13
BG4	1280.4	34.5	37.7	35.3	6.2	20.8	11.2	12	6	18
BG5	1308.2	33.1	43.6	40.9	5.5	10.1	14.1	12	3	15

1.2 研究方法

1.2.1 数据获取 数据获取包括外业调查和室内工作。外业调查共进行 2 次,第 1 次外业调查于 2019 年 8—9 月进行,此时正值雨季,浅层滑坡和崩塌发生的可能性较大,新发育的失稳体边界易于识别;调查内容包括使用手持式 GPS 记录失稳体地理坐标、高程,辨别失稳体类型(浅层滑坡或崩塌),拍照并记录失稳体周边的植被类型和植被盖度。第 2 次外业调查于 2021 年 4 月底进行,此时大部分植被尚未返青,植被盖度较低,有利于保证航拍质量;调查内容是使用 DJI Phantom4RTK 无人机对 5 条支沟进行垂直摄影测量,首先利用 DJI GS Pro 进行航线规划,设置航向重叠度和旁向重叠度均为 80%,设置飞行高度为 100 m,飞行速度为 7.9 m/s,然后选择合适的起降点,在晴朗或多云天气开展飞行。室内工作包括模型建立和参数提取两部分,具体为:首先使用 Argisoft Photoscan Pro 软件处理各条支沟照片生成三维模型,根据第 1 次外业调查的结果在三维模型中确定浅层滑坡和崩塌的位置,使用画图工具勾绘失稳体和上方未失稳区域,保存边界坐标点,利用测量工具测量浅层滑坡和崩塌的长度、宽度、周长和面积,使用地面点分类工具剔除植被并最终生成各条支沟高精度 DEM(分辨率 0.7 m);参数提取是将 DEM 数据导入 Arcgis 10.2 软件中,同时将失稳体和上方未失稳区域的边界坐标导入,使用工具箱中的要素转面工具生成面要素,并投影到对应的坐标系;使用工具箱中的表面分析、水文分析和栅格计算器工具,提取 5 条支沟的坡度、坡向(0~360°)、径流流路比降、径流流路长度、汇水面积、沟壑密度、距离沟道远近、地形湿度指数等地形因子;然后通过失稳体的面要素对坡向、

沟壑密度、距离沟道远近进行区域统计,通过上部未失稳区域的面要素对坡度、径流流路比降、径流流路长度、汇水面积、地形湿度指数进行区域统计,其平均值即为该处失稳体的参数指标。

1.2.2 地形因子 在上述地形因子中径流流路比降是指某栅格在其径流方向上与其临近栅格间高程差与距离的比值,以百分比表征,反映径流方向水力梯度的分布情况;径流流路长度指地面上一点沿径流方向到其流向起点间的最大地面距离在水平面上的投影长度,该值越大,坡面长度越长,汇集的流量越大;汇水面积指上游汇流区域流入该单元的栅格点总数,根据栅格分辨率 0.7 m×0.7 m 换算为面积;通过填洼后的高精度 DEM 设置阈值(最小汇水面积>2 500 m²)提取河网^[21],然后利用线密度和欧氏距离工具得到沟壑密度和距离沟道远近;地形湿度指数指单位等高线长度上的汇水面积和坡度值之比的自然对数,定量描述地形对土壤水分的影响,该值越大,说明该区域的土壤越容易达到饱和从而产流^[22],计算公式为:

$$TWI = \ln(SCA / \tan \beta) \quad (1)$$

式中:TWI 为地形湿度指数;SCA 为单位等高线长度汇水面积(m²/m); β 为局地坡度(°),对于以栅格形式表示的数字高程模型 DEM,SCA 表示某栅格的汇水面积与 DEM 栅格分辨率的比值, β 对应于该栅格局地坡度。

1.2.3 数据分析方法 采用相对密度^[8]分析比较浅层滑坡和崩塌在不同坡向(0~360°)的分布情况,计算公式为:

$$RD = \frac{N_i / S_i}{N / S} = \frac{N_i / N}{S_i / S} \quad (2)$$

式中:RD 为相对密度;S 为调查区域的总面积(m²);

N 为调查浅层滑坡或崩塌的总数量; S_i 为不同坡向范围($0\sim 180^\circ, 180^\circ\sim 360^\circ, 0\sim 90^\circ, 270^\circ\sim 360^\circ, 90^\circ\sim 270^\circ$)的面积(m^2); N_i 为不同坡向范围浅层滑坡或崩塌的数量; 相对密度越大, 表明该坡向浅层滑坡或崩塌越易发生。

主成分分析是重要的多元统计方式, 可以在不丢失原始数据主要信息的前提下, 提取数据信息, 排除原始数据中相互重叠的信息, 起到降维作用, 用较少的数据表达原始数据, 使问题简化。使用 SIMCA 14.1.0 软件对 2 类失稳体的地形因子进行主成分分析(PCA-X), 为了避免不同量纲对分析结果的影响, 先对原始数据进行标准化处理^[23]。使用 SPSS 26 软件对浅层滑坡和崩塌形态特征进行描述性统计, 使用 Origin 2018 和 Coreldraw X4 软件制图。

2 结果与分析

2.1 浅层滑坡和崩塌形态特征

由表 2 可以看出, 浅层滑坡和崩塌的规模都较小, 长度均不超过 60 m, 宽度、周长和面积分别在 $0\sim 30, 0\sim 170, 0\sim 1\ 300\ m^2$ 。浅层滑坡的长度、宽度、周长和面积均值均大于崩塌, 说明浅层滑坡在规模上通常大于崩塌; 变异系数是标准差与均值之比, 其值越高, 说明指标变化程度越大。比较浅层滑坡和崩塌长度、宽度、周长和面积的最大值、最小值和变异系数发现, 浅层滑坡各形态指标的最小值均低于崩塌, 而最大值和变异系数均高于崩塌, 说明浅层滑坡的形态变化范围更大。不同形态特征之间存在一定的相关性, 浅层滑坡周长随其长度的增加呈线性函数增加, 随宽度的增加呈指数函数增加, 决定系数 R^2 分别为 0.88 和 0.77(图 1a、图 1b); 面积随长度或宽度的增加均呈幂函数增加, 幂指数分别为 1.676 和 2.409, 决定系数 R^2 分别为 0.88 和 0.75(图 1c、图 1d), 说明对于浅层滑坡, 其宽度对周长和面积大小的限制作用更强。崩塌周长和面积随长度或宽度的增加均呈线性函数增加, 说明崩塌的形态较为均匀。浅层滑坡和崩塌的面积随周长增加均呈幂函数增加(图 1e), 决定系数 R^2 分别为 0.98 和 0.91。

表 2 浅层滑坡和崩塌形态特征比较

失稳类型	形态指标	最大值/m	最小值/m	均值/m	标准差/m	变异系数/%
浅层滑坡	长	60.0	3.4	17.3	11.1	64.3
	宽	29.3	3.7	12.7	6.7	52.7
	周长	166.6	13.7	54.1	31.4	58.0
	面积	1294.4	12.8	215.6	272.0	126.2
崩塌	长	32.9	6.4	15.9	6.7	41.8
	宽	27.1	4.7	11.5	5.4	47.0
	周长	82.0	22.3	48.0	14.4	30.0
	面积	443.0	38.5	140.2	81.8	58.4

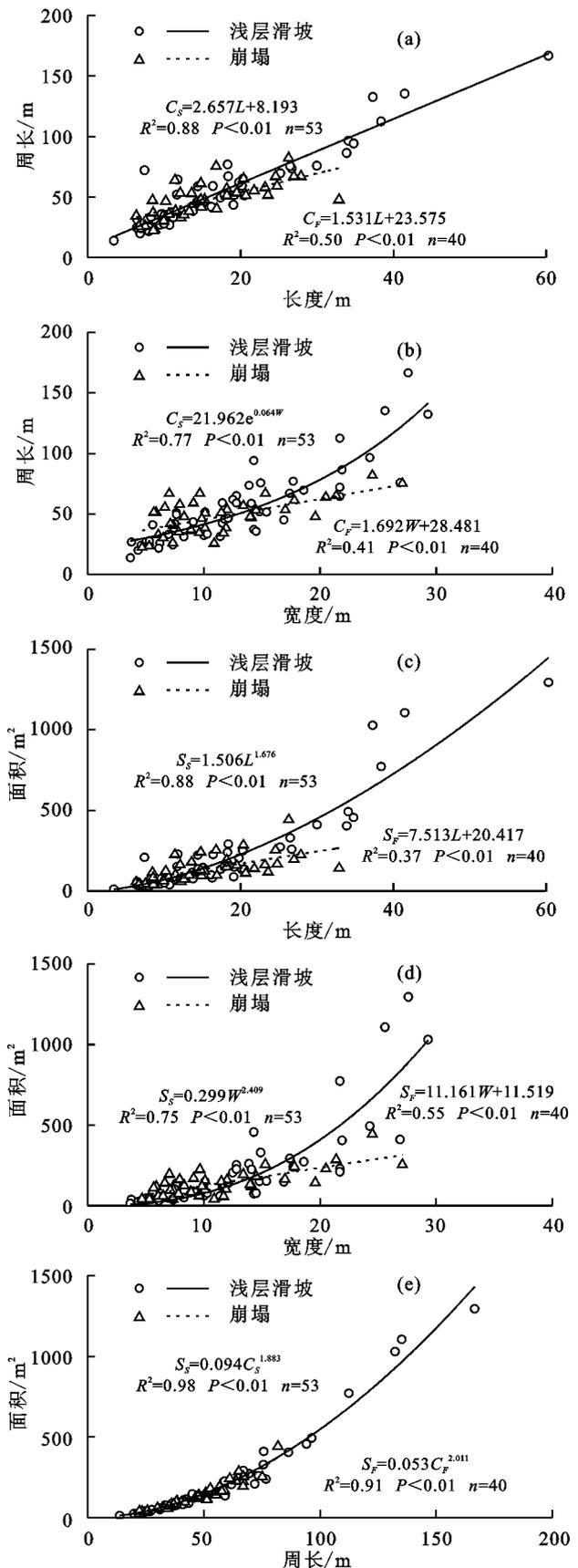


图 1 浅层滑坡和崩塌形态特征间的相互关系

对浅层滑坡和崩塌形态特征与沟壑密度和距离沟道远近进行 Pearson 线性相关分析(表 3), 结果表明, 浅层滑坡和崩塌长度、宽度、周长和面积与沟壑密度均呈负相关关系, 而与距离沟道远近均呈正相关关

系;说明沟壑密度越大,浅层滑坡和崩塌发育的规模越小,而距离沟道越远,浅层滑坡和崩塌发育的空间范围越大,其规模越大。具体来看,浅层滑坡的形态特征与沟壑密度和距离沟道远近均在 $P < 0.01$ 水平上显著相关,而崩塌只有长度和周长与沟壑密度和距离沟道远近在 $P < 0.01$ 水平上显著相关,面积和距离沟道远近在 $P < 0.05$ 水平上显著相关,宽度与沟壑密度和距离沟道远近均不显著相关。说明与崩塌相比,浅层滑坡形态特征与沟壑密度和距离沟道远近的相关性更加密切。

表 3 失稳体形态特征与沟壑密度和距离沟道远近的相关系数

形态特征	浅层滑坡		崩塌	
	沟壑密度	距离沟道远近	沟壑密度	距离沟道远近
长度	-0.54**	0.55**	-0.41**	0.62**
宽度	-0.61**	0.51**	-0.10	0.02
周长	-0.60**	0.59**	-0.40**	0.47**
面积	-0.55**	0.56**	-0.30	0.38*

注:*表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关;**表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关。

2.2 地形因子对浅层滑坡和崩塌的影响

地形因子显著影响坡面水文过程和坡体稳定性,对浅层滑坡和崩塌的坡度、径流流路比降、径流流路长度、汇水面积、沟壑密度、距离沟道远近和地形湿度指数等地形因子进行主成分分析(PCA-X),模型方差贡献率和因子载荷矩阵见表 4。由表 4 可知,模型

表 4 主成分分析方差贡献率(R^2)和因子载荷矩阵

主成分	R^2	累计 R^2	因子载荷矩阵						
			坡度/ (°)	径流流路 比降/%	径流流路 长度/m	汇水 面积/ m^2	沟壑密度/ ($km \cdot km^{-2}$)	距离沟道 远近/m	地形湿度 指数
1	0.39	0.39	0.70	0.72	-0.62	-0.62	0.26	-0.19	-0.93
2	0.31	0.70	-0.46	-0.45	-0.65	-0.65	-0.61	0.73	-0.14
3	0.20	0.90	-0.49	-0.41	-0.37	-0.25	0.67	-0.56	0.02

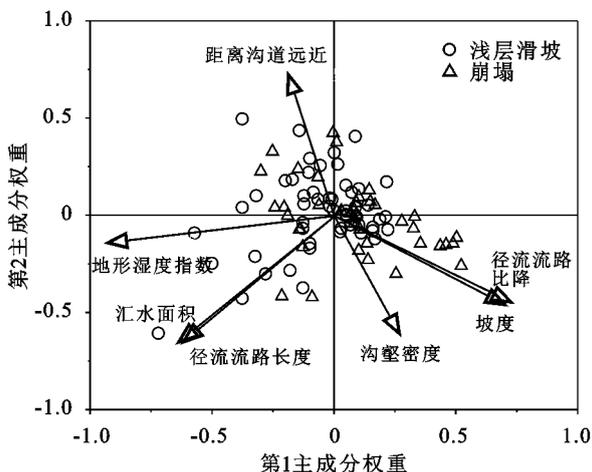


图 2 影响浅层滑坡和崩塌的地形因子主成分分析(PCA-X)

为进一步对比地形因子影响浅层滑坡和崩塌的差异,分别以地形湿度指数和径流流路长度为 X 轴,以坡度和径流流路比降为 Y 轴,绘制各失稳体的散

共提取 3 个主成分,第 1,2,3 个主成分的方差贡献率分别为 0.39,0.31 和 0.20,累计方差贡献率 R^2 达到 0.90。由因子载荷矩阵可以看出,第 1 主成分中径流流路比降的载荷值(0.72)最大,其次为坡度(0.70),负载荷值中地形湿度指数(-0.93)最高,说明第 1 主成分综合反映地形湿度指数、径流流路比降和坡度 3 个因子的信息;第 2 主成分中径流流路长度、汇水面积和距离沟道远近因子载荷的绝对值均不低于 0.65,说明第 2 主成分主要是由径流流路长度、汇水面积和距离沟道远近构成的综合指标;第 3 主成分中沟壑密度载荷值最大,达到 0.67,表明第 3 主成分中沟壑密度为主要评价指标。提取模型的前 2 个主成分进一步分析(图 2)可以看出,地形湿度指数、汇水面积和径流流路长度三者呈正相关关系,且与沟壑密度和距离沟道远近相关性较差,与坡度和径流流路比降呈负相关关系;而坡度、径流流路比降和沟壑密度三者呈正相关关系,与距离沟道远近呈负相关关系。比较浅层滑坡和崩塌在第 1、第 2 主成分因子载荷图(图 2)上的分布发现,浅层滑坡倾向聚集于地形湿度指数、汇水面积和径流流路长度较大的区域,崩塌则倾向聚集于坡度和径流流路比降较大的区域,沟壑密度和距离沟道远近对两者聚类的影响不明显,表明地形湿度指数、汇水面积、径流流路长度、坡度和径流流路比降是区分浅层滑坡和崩塌发生条件的主要地形因子。

点图(图 3a、图 3b)。由图 3a 可知,浅层滑坡均发生在坡度 $< 55^\circ$ 的区域,而崩塌发生的坡度均 $> 30^\circ$,坡度最大值接近 70° ;浅层滑坡发生位置的地形湿度指数均 > 0.50 ,最大值接近 3.00,而崩塌发生位置的地形湿度指数均 < 2.00 ,最小值为 0.17;在坡度为 $30^\circ \sim 55^\circ$ 、地形湿度指数为 0.50~2.00 的区域,浅层滑坡和崩塌均有较大比例分布,分别占 81.1% 和 72.5%;由图 3b 可知,径流流路比降和径流流路长度对浅层滑坡和崩塌的影响差异明显,浅层滑坡主要发生在径流流路比降为 60.0%~120.0% 的区域,而崩塌主要发生在 60.0%~200.0%,并且 30% 的崩塌发生在径流流路比降 $> 120.0\%$ 的区域;而在径流流路长度上,其值较大的区域更易发生浅层滑坡,最大值接近 25.00 m,崩塌发生的区域除 2 处径流流路长度为 16.23,19.73 m 外,其余均 < 15.00 m;在径流流路比降为 60.0%~120.0%、

径流流路长度为 0~15.00 m 的区域,浅层滑坡和崩塌分别占 88.7% 和 67.5%。因此,在坡度(30°~55°)、地形湿度指数(0.50~2.00)适中、径流流路比降(60.0%~120.0%)和径流流路长度(0~15.00 m)较小的区域,浅层滑坡和崩塌分布较为集中;而在坡度 > 55° 和地

形湿度指数 < 0.50、径流流路比降 > 120.0% 和径流流路长度 < 15.00 m 的区域,重力侵蚀以崩塌为主,反之,在坡度 < 30° 和地形湿度指数 > 2.00、径流流路比降 < 120.0% 和径流流路长度 > 15.00 m 的区域,重力侵蚀以浅层滑坡为主。

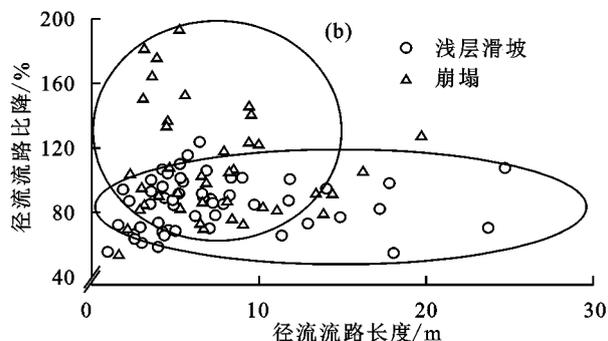
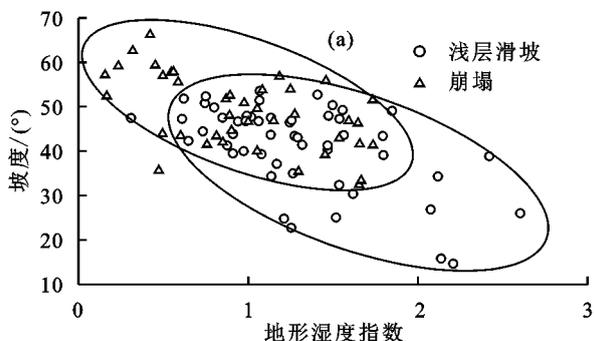


图 3 浅层滑坡和崩塌发生的临界地形条件比较

2.3 坡向与植被对浅层滑坡和崩塌的影响

通过野外调查植被类型和植被盖度及对 DEM 数据进行表面分析,得到各浅层滑坡和崩塌周围的植被信息和坡向分布(图 4a、图 4b)。结果表明,浅层滑坡在灌木和草本群落覆盖的坡面均可发生,其中,灌木坡面 31 处,草本坡面 22 处。灌木坡面浅层滑坡在 0~180° 坡向上的数量(22 处)远大于 180°~360° 坡向(9 处),其中 45°~135° 坡向上的浅层滑坡数量占灌木坡面总数的 56.3%;调查区域 0~180° 和 180°~360° 坡向的面积分别占调查区域总面积的 65.9% 和 34.1%(表 5),灌木坡面浅层滑坡在 2 种坡向范围的数量比例分别为 79.1% 和 28.1%,相对密度分别为 1.09 和 0.82,表明灌木坡面浅层滑坡在 0~180° 坡向上更易发生。草本坡面浅层滑坡主要发生在 0~90° 和 270°~360° 坡向,占草本坡面浅层滑坡总数的 66.7%(图 4 和表 5),其次发生在 90°~135° 和 225°~270° 坡向(28.6%);调查区域 90°~270° 坡向和 0~90°, 270°~

360° 坡向的面积分别占调查区域总面积的 47.5% 和 52.5%,草本坡面浅层滑坡在 2 种坡向范围的数量比例分别为 33.3% 和 66.7%,相对密度分别为 0.70 和 1.27,表明草本坡面浅层滑坡在 0~90° 和 270°~360° 坡向上更易发生。植被覆盖类型对崩塌的影响与浅层滑坡明显不同,调查的 40 处崩塌,有 33 处发生在灌木坡面,仅有 7 处发生在草本坡面;灌木坡面崩塌在 0~180° 坡向上的数量(25 处)远大于 180°~360° 坡向(8 处),其中 45°~135° 坡向崩塌的数量占灌木坡面总数的 50.0%,灌木坡面崩塌在 0~180° 和 180°~360° 坡向上的数量比例分别为 75.0% 和 25.0%,相对密度分别为 1.14 和 0.73(表 5),表明灌木坡面崩塌在 0~180° 坡向更易发生。草本坡面崩塌有 5 处发生在 0~180° 坡向,2 处发生在 180°~360° 坡向,但因调查数量较少(7 处),坡向分布规律需要进一步明确。就植被盖度而言,浅层滑坡和崩塌在不同植被盖度(20%~100%)下均有发生(图 4)。

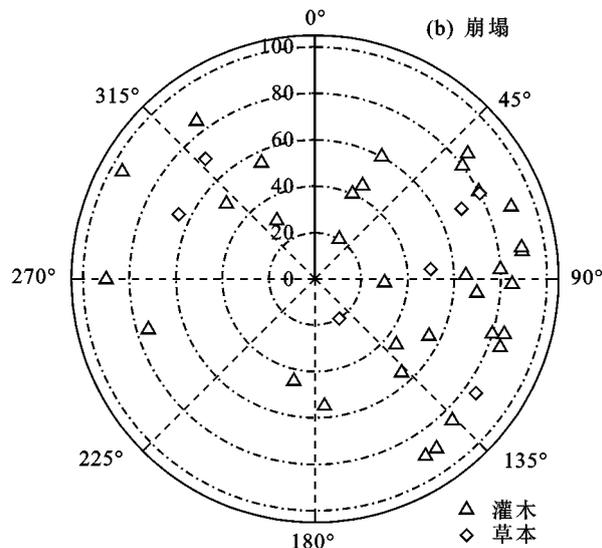
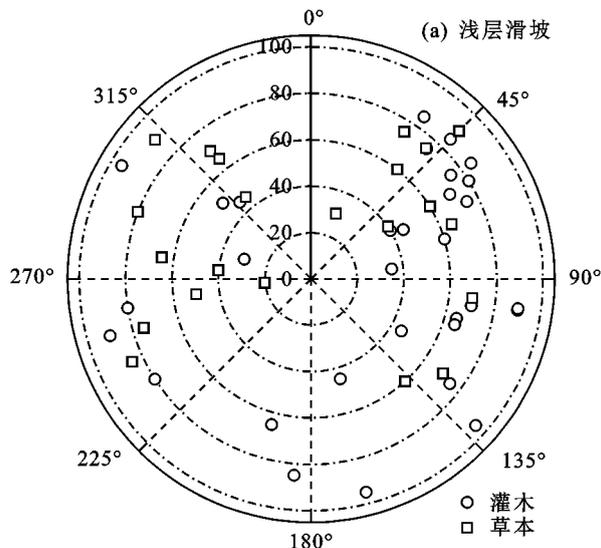


图 4 浅层滑坡和崩塌在不同植被类型和盖度条件下的坡向分布

表 5 不同坡向浅层滑坡和崩塌的数量和相对密度

坡向/ (°)	面积 比例/%	浅层滑坡数量比例/%		崩塌数量比例/%		浅层滑坡相对密度		崩塌相对密度	
		灌木	草本	灌木	草本	灌木	草本	灌木	草本
0~180	65.9	71.9	—	75	75	1.09	—	1.14	1.14
180~360	34.1	28.1	—	25	25	0.82	—	0.73	0.73
90~270	47.5	—	33.3	—	—	—	0.70	—	—
0~90 和 270~360	52.5	—	66.7	—	—	—	1.27	—	—

3 讨论

3.1 浅层滑坡和崩塌的形态特征

浅层滑坡和崩塌的失稳机制和发育地形条件存在显著差异,必然导致二者形态特征的明显不同^[3-4],浅层滑坡多发生在坡度较缓、坡面相对高度较大的地方,而崩塌常发生在坡度较陡的区域,并且浅层滑坡形变过程相对缓慢,而崩塌发生过程迅速^[12,18],因此浅层滑坡在规模上通常大于崩塌,并且形态变化范围更大;浅层滑坡和崩塌不同形态特征间存在良好的相关关系,与 Qiu 等^[8-9]的研究结果类似,但浅层滑坡以幂函数关系为主,而崩塌以线性函数关系为主,这可能与二者的形成机制不同有关,不同形成机制导致失稳体形态特征的自相似性差异明显。以往研究^[24-25]表明,重力失稳体数量随着其规模的增加而急剧减少,本研究结果与之相似,表现为浅层滑坡和崩塌数量随周长与面积的增加而迅速减少(图 1e)。浅层滑坡和崩塌的规模与沟壑密度呈负相关,与距离沟道远近呈正相关的结果(表 3),是因为沟壑密度越大,距沟道越近(图 2),则坡面相对高度越小,坡度越陡,而坡面相对高度和坡度是决定浅层滑坡和崩塌发育空间分布和有效临空面的关键因素,进而降低浅层滑坡和崩塌的长度、宽度、周长和面积^[9,11];浅层滑坡形态特征与沟壑密度和距离沟道远近的相关性优于崩塌,是因为崩塌多发生在距离沟道较近、失稳活跃的低矮陡坡^[26],加之其规模和形态变化范围均小于浅层滑坡,因此相关性较差。

3.2 浅层滑坡和崩塌发育的临界地形

通过 Arcgis 10.2 软件对 DEM 数据进行处理,获取浅层滑坡和崩塌的地形因子,发现在坡度和地形湿度指数适中、径流流路比降和径流流路长度较小的区域,浅层滑坡和崩塌发育强烈,而在坡度和径流流路比降较大、地形湿度指数和径流流路长度较小的区域,崩塌较为发育;反之,在坡度和径流流路比降较小、地形湿度指数和径流流路长度较大的区域,浅层滑坡是重力侵蚀的主要形式,这与已有的大量研究^[15,17-18]结论一致。这是因为降雨是诱发浅层滑坡和崩塌最主要的外部因素^[27],而地形条件控制着坡面水文过程,显著影响坡面径流的方向、流量大小和流速,进而影响降水入渗、土体基质势和抗剪强度^[6,28],坡度决定坡体所受剪切力的大小和受力状态,因浅层滑坡和崩塌的发生机制不同,其对水文条

件和坡度条件响应的敏感程度也会有所差异^[12]。本研究发现,浅层滑坡和崩塌主要发生在 0~180°坡向或 0~90°和 270°~360°坡向,这与 Li 等^[18]和尚慧等^[7]在黄土区野外调查失稳体时所得结果相似,即在辐射强度低、土壤含水量高的阴坡或半阴坡,更易发生坡体失稳;但与 Li 等^[1]在甘肃天水“7·26”极端暴雨后野外调查的结果有所不同。他们发现,阳坡和植被稀少的坡面更易发生滑坡,造成这种差异的原因可能是在极端暴雨条件下,土壤水分快速增加,降低坡向对土壤水分的影响,进而弱化坡向对滑坡的影响。与地形因子相比,植被对降雨诱发的浅层滑坡和崩塌的影响相对较小^[26,29],本次调查发现,崩塌主要发生在灌木覆盖坡面,而浅层滑坡在灌木和草本覆盖坡面均有发育,可能是因为在地势陡峭的沟坡上,灌木根系沿黄土垂直节理生长发育,增加土壤大孔隙,促进优先流发育,从而诱发崩塌^[30]。浅层滑坡和崩塌在不同植被盖度(20%~100%)下均有发生,原因可能与调查植被覆盖的区域为失稳体边缘区域,无法真实测得原有坡面植被盖度和目测法估算的植被盖度精度较低有关;同时植被对重力侵蚀的影响,主要取决于植物根系的数量、垂直分布,与根系的加筋效应密切相关,而本研究并没有测定根系参数,因而无法准确评估植被对浅层滑坡和崩塌的影响,因此,需要进一步在更大空间尺度上量化植被对浅层滑坡和崩塌的影响及其机制。

4 结论

(1)浅层滑坡的规模大于崩塌,其面积均值是崩塌的 2.64 倍,形态变化范围更大,面积的变异系数是崩塌的 2.16 倍。

(2)浅层滑坡和崩塌长度、宽度、周长和面积与沟壑密度均呈负相关关系,与距离沟道远近均呈正相关关系,浅层滑坡形态特征与沟壑密度和距离沟道远近的相关性更加密切。

(3)浅层滑坡和崩塌发育受到地形条件的显著影响,在坡度和地形湿度指数适中(30°~55°和 0.50~2.00)、径流流路比降和径流流路长度较小(60.0%~120.0%和 0~15.00 m)的区域,浅层滑坡和崩塌均较集中分布;在坡度和径流流路比降较大(>55°和 >120.0%)、地形湿度指数和径流流路长度较小(<0.50 和 <15.00 m)的区域,崩塌较为发育,而在坡度和径流流路比降较小(<30°和 <120.0%)、地形湿

度指数和径流流路长度较大(>2.00 和 >15.00 m)的区域,浅层滑坡较为发育。

(4)灌木坡面浅层滑坡和崩塌主要发生的坡向范围是 $0\sim 180^\circ$,草本坡面浅层滑坡主要发生的坡向范围是 $0\sim 90^\circ$ 和 $270^\circ\sim 360^\circ$ 。研究结果对于明确黄土丘陵沟壑区浅层滑坡和崩塌空间分布及其主控因素、重力侵蚀防治具有重要意义。

参考文献:

- [1] Li M Y, Ma C, Du C, et al. Landslide response to vegetation by example of July 25-26, 2013, extreme rainstorm, Tianshui, Gansu Province, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 80(1): 751-764.
- [2] 王新刚, 刘凯, 连宝琴, 等. 黄土一泥岩滑坡诱发因素及形成机理研究进展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 404-413.
- [3] 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): 10-15, 65.
- [4] 黄玉华, 武文英, 冯卫, 等. 陕北延安“7.3暴雨”诱发地质灾害主要类型与特征[J]. 西北地质, 2014, 47(3): 140-146.
- [5] 同霄, 彭建兵, 朱兴华, 等. 降雨作用下黄土浅层滑坡的危险性分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 109-113.
- [6] Guo W Z, Luo L, Wang W L, et al. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2019, 337: 69-78.
- [7] 尚慧, 倪万魁, 杜光波, 等. 黄土滑坡形成机理分析: 以宁夏彭阳县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2): 26-33.
- [8] Qiu H J, Cui Y F, Hu S, et al. Size distribution and size of loess slides in response to slope height and slope gradient based on field survey data[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 1443-1458.
- [9] Qiu H J, Cui P, Regmi A D, et al. Slope height and slope gradient controls on the loess slide size within different slip surfaces [J]. Physical Geography, 2017, 38(4): 303-317.
- [10] Ayalew L, Yamagishi H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan[J]. Geomorphology, 2005, 65: 15-31.
- [11] 殷昊, 刘飞, 杜立新, 等. 黄土高原区地形与植被分布规律对滑坡发生概率的影响[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 1016-1021.
- [12] Xu X Z, Liu Z Y, Xiao P Q, et al. Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity [J]. Catena, 2015, 135: 231-239.
- [13] Rengers F, McGuire L, Coe J A, et al. The influence of vegetation on debris-flow initiation during extreme rainfall in the northern Colorado Front Range[J]. Geology, 2016, 44(10): 823-826.
- [14] 邢书昆, 张光辉, 朱平宗. 黄土丘陵沟壑区退耕年限对根—土复合体抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 41-48, 54.
- [15] Wang G L, Li T L, Xing X L, et al. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 73(12): 7933-7944.
- [16] Yildiz A, Graf F, Rickli C, et al. Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus [J]. Catena, 2018, 166: 98-113.
- [17] 曹银真. 黄土地区重力侵蚀的机理及预报[J]. 水土保持通报, 1981(4): 19-23.
- [18] Li T L, Wang C Y, Li P. Loess Deposit and Loess Landslides on the Chinese Loess Plateau [M]// Wang F, Miyajima M, Li T, et al. Progress of Geo-Disaster Mitigation Technology in Asia. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 235-261.
- [19] 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): 62-67.
- [20] Wang H, Zhang G H, Li N N. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2019, 174: 24-35.
- [21] 胡胜. 黄土高原滑坡空间格局及其对地貌演化的影响 [D]. 西安: 西北大学, 2019.
- [22] 王洪明, 杨勤科, 姚志宏. 小流域尺度土壤水分与地形湿度指数的相关性分析[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 110-113.
- [23] 叶宗裕. 关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择[J]. 浙江统计, 2003(4): 25-26.
- [24] Florsheim J, Nichols A. Landslide area probability density function statistics to assess historical landslide magnitude and frequency in coastal California[J]. Catena, 2013, 109(5): 129-138.
- [25] 邱海军, 崔鹏, 胡胜, 等. 陕北黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡频率分布[J]. 地球科学, 2016, 41(2): 343-350.
- [26] Zhang M, Liu J. Controlling factors of loess landslides in western China [J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 59: 1671-1680.
- [27] Peruccacci S, Brunetti M T, Luciani S, et al. Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy[J]. Geomorphology, 2012, 139: 79-90.
- [28] Dai F, Lee F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong [J]. Geomorphology, 2002, 42(3/4): 213-228.
- [29] McGuire L, Rengers F, Kean J, et al. Elucidating the role of vegetation in the initiation of rainfall-induced shallow landslides: Insights from an extreme rainfall event in the Colorado Front Range[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43: 9084-9092.
- [30] 毛佳睿, 武雄. 山西省黄土崩塌影响因素及时空分布特征[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 3799-3807.