

甘肃省小陇山林区降雨型浅层滑坡 汇水面积—坡度关系及其影响因素

张晓曼¹, 马超^{1,2}, 张岩^{1,2}, 邓家勇¹, 代智盛³

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,
山西 临汾 042200;3.云南建设基础设施投资股份有限公司,昆明 650000)

摘要: 沟头发生侵蚀的地形临界模型可有效预测侵蚀沟的形成条件,浅层滑坡失稳形成的洼地也是沟头形成的方式之一。为探究浅层滑坡临界起动模型的特点,以甘肃省天水市小陇山林区的降雨型浅层滑坡为研究对象,运用汇水面积—坡度关系,构建临界起动模型,与黄土高原典型侵蚀沟(浅沟、切沟)的临界起动模型进行对比分析,并探讨土地利用类型、植被类型和土壤质地对该模型的影响。结果表明:(1)浅层滑坡临界起动模型为 $S = 3.50A_s^{-0.34}$,其侵蚀阈值为 3.50,大于黄土高原典型浅沟(0.96)和切沟(1.54)的侵蚀阈值。研究区浅层滑坡一般发生于土层较薄的陡坡地带,其平均坡度($\bar{S} = 1.26$)大于浅沟($\bar{S} = 0.35$)与切沟($\bar{S} = 0.46$),单位汇水面积($\bar{A} = 89.08 \text{ m}^2/\text{m}$)小于浅沟($\bar{A} = 920.93 \text{ m}^2/\text{m}$)和切沟($\bar{A} = 1\,129.82 \text{ m}^2/\text{m}$)。(2)汇水面积与坡度平方的乘积(AS^2)代表了沟头产生侵蚀的能量指标值。研究区浅层滑坡 AS^2 值在 $269.1 \sim 5\,703.2 \text{ m}^2$,平均值为 $1\,772.97 \text{ m}^2$,黄土高原浅沟 AS^2 值在 $4.74 \sim 892.66 \text{ m}^2$,切沟在 $41 \sim 814 \text{ m}^2$,启动能量值方面,浅沟 < 切沟 < 浅层滑坡。(3)土地利用类型、植被类型和土壤质地通过影响土壤的抗冲力、渗透性和黏粒含量,从而对浅层滑坡的起动难易程度产生影响。在不同的土地利用方式中,农地最易发生侵蚀,其次是林地。油松林附近浅层滑坡的抗侵蚀能力高于日本落叶松林。研究结果为探究浅层滑坡的起动条件提供理论依据。

关键词: 浅层滑坡; 汇水面积—坡度; 地貌阈值; 植被种类

中图分类号: P642.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0054-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.008

Research on the Area-Slope Relationship of Typical Rainfall Shallow Landslides in Xiaolong Mountain Forest Area of Gansu Province and Its Influencing Factors

ZHANG Xiaoman¹, MA Chao^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2}, DENG Jiayong¹, DAI Zhisheng³

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Ji County Station in Shanxi, Chinese National Ecosystem Research Network, Linfen,

Shanxi 042200; 3.Yunnan Infrastructure Investment Co. Ltd., Kunming 650000)

Abstract: The topographic critical model for the occurrence of erosion at gully head can effectively predict the conditions for the formation of erosion gullies, the depression formed by shallow landslide instability is also one of the ways of gully head formation. In order to explore the characteristics of the critical initiation model of shallow landslides, the rainfall-type shallow landslides in the Xiaolong mountain area of Tianshui City, Gansu Province was taken as the research project. We used area-slope relationship to construct the shallow landslide critical initiation model, and compared with the critical initiation model for typical erosion gully ephemeral gullies and permanent gullies located in the Loess Plateau. The effects of land use type, vegetation type and soil texture on the critical initiation model were also discussed. The results showed that: (1) The critical initiating model of shallow landslides was $S = 3.50A_s^{-0.34}$, and its topographic threshold was 3.50, which was larger than ephemeral gullies (0.96) and permanent gullies (1.54) in the Loess Plateau. Shallow

收稿日期: 2022-11-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(42130701, 42177309)

第一作者: 张晓曼(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事山地灾害防治研究。E-mail: 1047376252@qq.com

通信作者: 马超(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事山地灾害成灾动力研究。E-mail: sangoxumei@163.com

landslides in the study area generally occurred on steep slope area with thin soil layer, and the average slope ($\bar{S}=1.26$ m/m) was higher than ephemeral gullies ($\bar{S}=0.35$ m/m) and permanent gullies ($\bar{S}=0.46$ m/m). The unit upslope drainage area ($\bar{A}=89.08$ m²/m) was less than the ephemeral gullies ($\bar{A}=920.93$ m²/m) and permanent gullies ($\bar{A}=1\ 129.82$ m²/m). (2) The product of upslope drainage area and the square of the critical slope gradient (AS^2) was used as an important energy index for gully formation. The AS^2 value of shallow landslide in the study area ranged from 269.1 to 5 703.2 m², with an average value of 1 772.97 m². The AS^2 value of ephemeral gullies in the Loess Plateau ranged from 4.74 to 892.66 m², and that of permanent gullies in 41 to 814 m². In terms of starting energy value, ephemeral gullies < permanent gullies < shallow landslides. (3) Land-use type, vegetation type and soil texture had an effect on the initiation of shallow landslide by affecting the resistance, permeability and clay content of soil. Among different land use modes, agricultural land was the most vulnerable to erosion, followed by forest land. The erosion resistance of landslides near *Pinus tabulaeformis* forest was higher than those in *Larix kaempferi* forest. The results of this study provide a theoretical basis for exploring the initiation conditions of shallow landslides.

Keywords: shallow landslide; area-slope relationship; topographic threshold; vegetation type

沟蚀是土壤侵蚀的重要研究内容,在一定时空尺度下监测和分析不同侵蚀营力引发的侵蚀沟阈值模型一直是研究的重点^[1]。一般而言,坡面径流剪切力是径流深度和坡度的函数,当径流产生的剪应力超过土壤的抗剪强度,土粒会被启动,此过程主要取决于沟头上方的汇水面积(A)和沟头发育处的坡度(S),两者一般呈反比关系,并且可用幂率函数($S=kA^{-b}$)来描述^[2-3]。在此基础上,研究者基于各自研究区的不同侵蚀特点,建立了不同的地貌临界阈值模型。如东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型分别为 $S=0.0631A^{-0.46}$ 和 $S=0.1161A^{-0.45}$ ^[4];陕西省子洲县米脂沟流域内浅沟和切沟的地貌临界模型分别为 $S=0.6073A^{-0.14}$ 和 $S=1.2065A^{-0.23}$ ^[5];云南元谋干热河谷沟蚀临界模型为 $S=0.5195A^{-0.09}$ ^[6]。相关研究^[7]指出,汇水面积和坡度平方的乘积(AS^2)是确定沟谷发育的重要能量指标,黄土高原研究^[8-9]发现, AS^2 一般在 40~900 m²。降雨诱发的浅层滑坡也是侵蚀沟发展的主要形式之一,坡面上一定厚度的土层在滑坡后缘汇水区经水流作用和沿重力斜坡方向分量共同作用下失稳,滑坡后缘即视为坡面侵蚀沟头位置,因此,基于坡度和汇水面积曲线可以模拟浅层滑坡的发生位置,进而得到降雨型浅层滑坡的坡度—汇水面积临界模型。因坡面径流、渗流等引发的侵蚀沟地貌阈值模型已有较多研究,相比较而言,降雨型浅层滑坡地貌阈值模型及其影响因素研究较少,也是制约水土流失预测中重力侵蚀预测预报模型的主要瓶颈问题之一。

2013年7月25日天水市遭遇大范围罕见暴雨天气,诱发了秦州区小陇山林区内大量的浅层滑坡和泥石流灾害,给当地人民和生命财产造成了巨大损失^[10-11]。“7·25”群发性地质灾害是天水市自1984

年以来最严重的地质灾害事件,此次事件为研究地貌阈值模型及其影响因素提供了天然的试验场。通过对本次群发性滑坡灾害的启动条件开展研究,探究降雨型浅层滑坡与径流引发的侵蚀沟在地貌阈值模型参数上的差异,并分析土地利用类型、植被种类和土壤质地对 $A-S$ 关系的影响,以期为该地区的滑坡预测预报和防灾减灾提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省天水市秦州区娘娘坝镇,属于陇西黄土高原和秦岭山区的过渡地带,生态环境脆弱,软弱岩土广布,是我国黄土高原地区崩塌、滑坡和泥石流等自然灾害发生最为频繁的地区之一^[10-11]。面积 734.68 km²,海拔 1 375.81~2 227.34 m,坡陡沟深(图 1)。出露的主要地层包括更新世马兰黄土、新近系泥岩和砂岩、安山期花岗岩、上泥盆统板岩和石英砂岩等,土层厚度不超过 3 m^[12]。该地区为温带季风气候,年平均气温 10.1℃,年平均降水量 491.6 mm,降雨多集中在 6—9 月,强度大,历时短^[13]。2013 年 6—7 月,天水市出现了大范围的连续强降雨天气,其中 6 月 20 日、7 月 8 日、7 月 25 日娘娘坝镇分别出现日降水量超过 100 mm 的暴雨,6—7 月累积降雨量达到 715.8 mm,意味着娘娘坝镇在 2 个月内遭遇了往年年均降雨量的 1.45 倍(图 2)^[14]。充足的前期降水和短历时暴雨诱发了区域群发性山体滑坡泥石流灾害。

1.2 数据获取

使用由美国 GeoEye-1 卫星于灾前(2010 年 4 月 30 日)和灾后(2013 年 10 月 8 日)所拍摄的高分辨率遥感影像,通过目视解译对滑坡区域进行识别和

筛选,得到矢量化滑坡区域,最终分别在中寨、刘家河和上窑 3 个地方选取了典型滑坡共 65 处。采用大疆悟 Inspire 2 无人机对研究区进行拍摄,通过控制测量、航片选取、空三加密等,得到高分辨率的数字表面

模型 DSM。运用地理信息系统类软件,在每处滑坡的后缘处勾勒 1 条线段,利用水文分析工具和坡度计算工具,输入 DSM,提取该线段处的汇流累积量和平均坡度,进而得到滑坡启动的汇水面积与坡度。

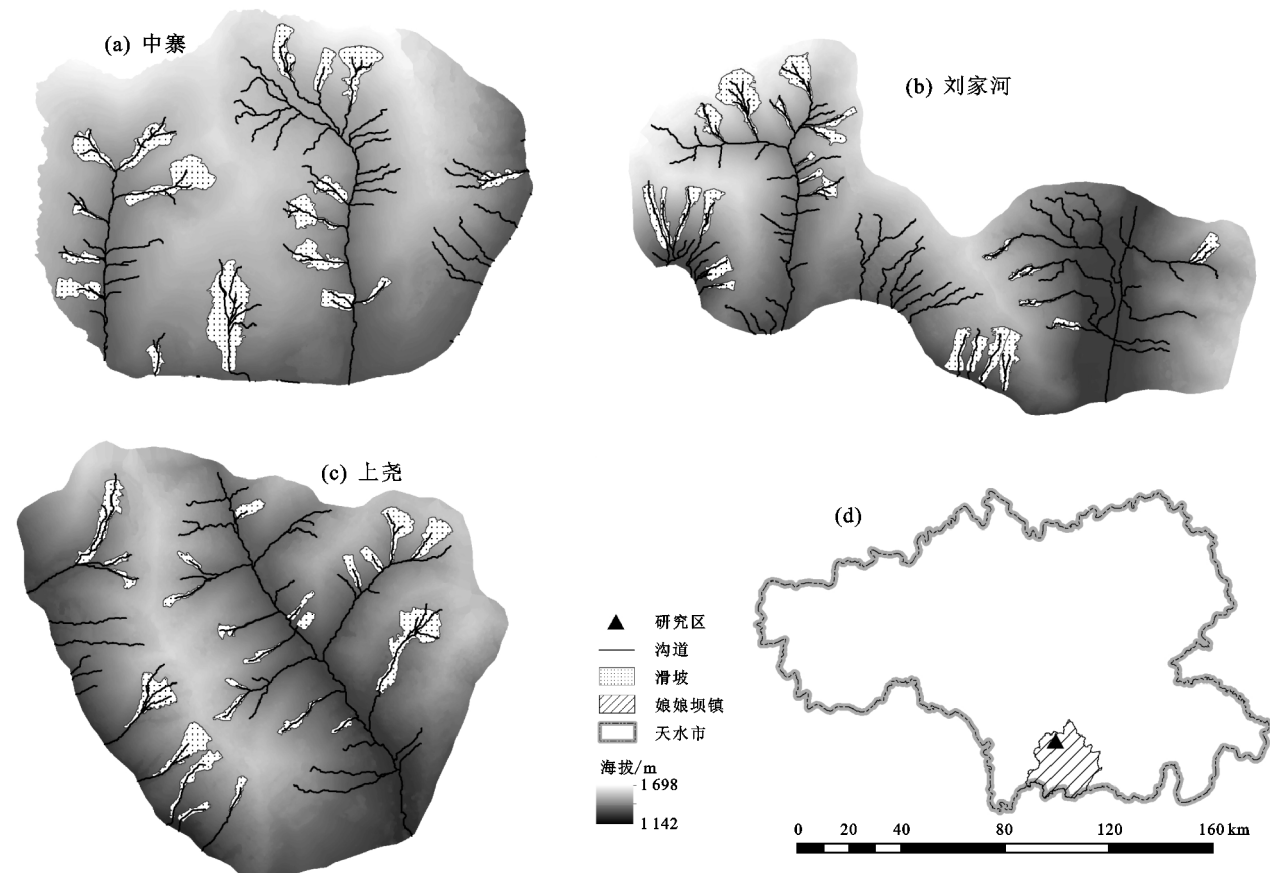


图 1 研究区概况

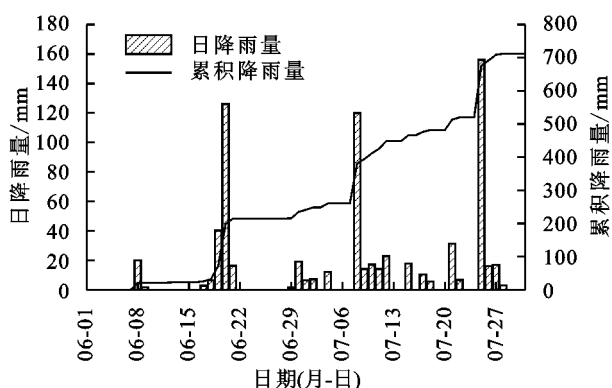


图 2 2013 年 6—7 月娘娘坝镇雨量监测数据

由遥感影像和现场调查可知,研究区内土地利用类型主要分为耕地和林地 2 大类。娘娘坝镇自 1974 年起进行了大面积人工造林,造林主要林分类型为针叶树种,包括松科的油松和日本落叶松。根据叶片颜色差异区分不同树种,深色常绿林分类型为油松,浅色落叶林分类型为日本落叶松。在 3 个地区各选取若干典型滑坡,在滑坡的边界外缘设置 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 大小的样方,在样方内垂直挖掘后壁 1 m 深,两侧 $50\text{—}60\text{ cm}$ 深的土壤剖面,在剖面两侧使用 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的金属框架统计不同深度处的根系数量,并进

行样方内树种根系分布和平均胸径的调查。使用高 10 cm ,直径 5 cm 的定制环刀采取滑动层原状土样,并用自封袋装取若干散土。采用定水头法进行根土复合体渗透系数的测量,使用激光粒度仪 Malvern Mastersizer 3000 测定土壤质地。

1.3 模型构建

将得到的 65 组数据绘入以汇水面积为横轴,坡度为纵轴的双对数坐标系中,得到临界起动模型。建立临界起动模型时,汇水面积指单位汇水面积(A_s),即某段等高线上方汇水面积(A)与等高线长度(L)的比率,从而避免不同规模滑坡的差异,使标准具有可比性^[15]。本文用滑坡后缘宽度代替等高线长度(图 3)。

该模型中的参数获取一般有 2 种方法:一是分散数据的下限所对应的参数,用于沟蚀的预测;二是通过数据回归得到的参数,用于对主导沟蚀过程进行分析^[16]。本文分别采用 2 种方法对起动模型中的参数进行分析。第 1 种方法进行滑坡起动阈值的分析,第 2 种方法分析不同因素影响滑坡起动难易程度。临界坡度与汇水面积之间为幂率函数的形式,公式为:

$$S \geq KA_s^{-b} \quad (1)$$

式中: S 为沟头发育处的坡度,此处取 2 点的高程差与其水平距离的百分比,即百分比坡度(m/m); A_s 为沟头以上的单位汇水面积(m^2/m);系数 k 为土壤抵御沟头侵蚀的阻力特征,即沟蚀发生的难易程度,与降雨、植被、土壤性质和土地利用方式密切相关^[17]; b 为反映汇水面积相对重要性的指标, b 值越小,说明汇水面积在侵蚀过程中的发挥的作用越小,反之越大,它可以指示一个地区的主要侵蚀过程^[6]。

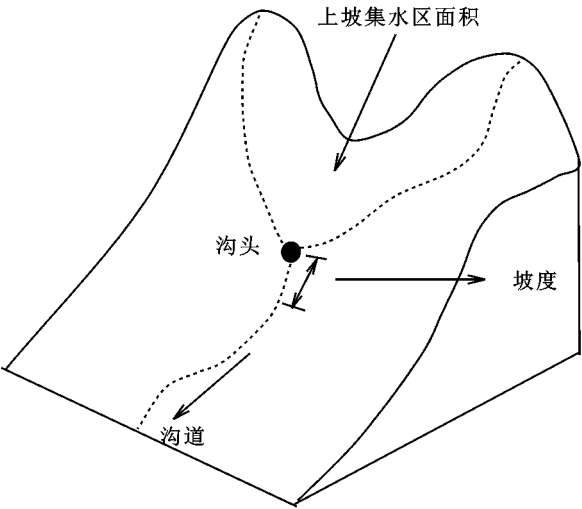


图 3 沟头面积—坡度示意

2 结果与分析

2.1 浅层滑坡临界起动模型分析

将研究区的 A_s 、 S 数据汇入双对数坐标系,选择最左下方的 2 个数据点作为下限点,由下限点所拟合的直线即为临界线,临界线以下为无滑坡发生的区域,以上为发生的区域,得到 $S=3.50A_s^{-0.34}$ 。将浅层滑坡和黄土高原地区由坡面漫流侵蚀导致的侵蚀沟进行对比,前人^[8-9,15]对山西绥德的浅沟、切沟和陕西子午岭地区的浅沟进行研究,得到临界阈值模型分别为 $S=0.96A_s^{-0.33}$ 、 $S=1.54A_s^{-0.23}$ 和 $S=1.43A_s^{-0.43}$ 。将 4 类数据进行对比,最终得到图 4。

由图 4 可知,浅层滑坡的数据点在双对数坐标系下整体位于侵蚀沟的上方,单位汇水面积与坡度呈现出幂率函数形式的递减关系,即较小的单位汇水面积下,沟头侵蚀需要较陡的坡度,反之亦然。浅层滑坡

的起动阈值(k)为 3.50,3 类侵蚀沟的 k 分别为 1.54, 0.96, 1.43,即浅层滑坡的侵蚀阈值高于浅沟和切沟,更难以起动。

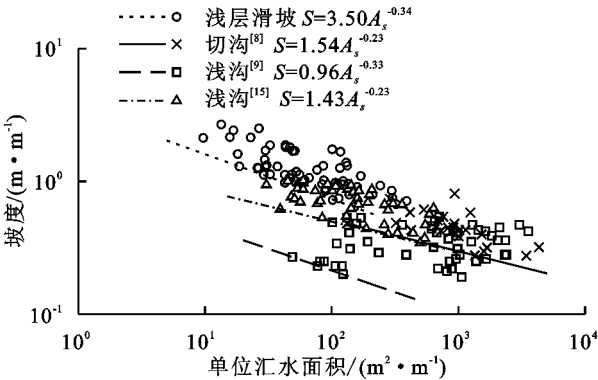


图 4 浅层滑坡与浅沟、切沟启动条件对比

本研究选取 Wu 等^[8]和 Cheng 等^[9]的研究,分别代表切沟和浅沟,与浅层滑坡进行进一步的对比分析。由表 1 可知,浅层滑坡发生所需的单位汇水面积($\bar{A}_s=89.08\text{ m}^2/\text{m}$)小于浅沟($\bar{A}_s=920.93\text{ m}^2/\text{m}$)和切沟($\bar{A}_s=1129.82\text{ m}^2/\text{m}$),坡度($\bar{S}=1.26\text{ m/m}$)陡于浅沟($\bar{S}=0.35\text{ m/m}$)和切沟($\bar{S}=0.46\text{ m/m}$),反映浅层滑坡与侵蚀沟在形成方式和地形特征等方面的不同。降雨型浅层滑坡通常在长期的前期降雨加短历时高强度的暴雨下发生,具有突发性和很强的冲击性。当降雨入渗后,水分在土体低导水率层上累积,导致侧压水头上升,从而产生正孔隙水压力,孔隙水压力若不能及时消散,则土体抗剪强度就会减小,导致土体迅速失稳^[18-19]。浅层滑坡基岩深度分布较浅,侵蚀深度通常在 0.5~1.0 m。且研究区滑坡以黄土滑坡为主,滑面多以黄土中的垂直节理、裂隙发育,滑动面倾角陡峭,一般大于 40°^[11]。从而在 $A-S$ 关系中表现出较小的单位汇水面积和较陡的坡度。而侵蚀沟主要由暴雨过程和雨后间歇性水流冲刷形成,属于坡面漫流性质,侵蚀时间长,具有相对永久性^[20]。可切入母质或松散基岩,深度在 1 m 以上,甚至可达 20~100 m^[21],最初以槽形断面出现,通过沟头溯源、沟底下切和沟岸扩张,逐渐发展成“U”或“V”形^[22],导致较深的侵蚀深度和较缓的起动坡度。

表 1 浅层滑坡、切沟和浅沟地形参数

统计值	坡度(S)/($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)			单位汇水面积(A_s)/($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)			AS^2/m^2		
	滑坡	浅沟	切沟	滑坡	浅沟	切沟	滑坡	浅沟	切沟
最小值	0.64	0.19	0.28	9.69	48.87	132.33	269.10	4.74	41
最大值	2.68	0.54	0.81	390.45	3578.19	4330.82	5703.20	892.66	814
平均值	1.26	0.35	0.46	89.08	920.93	1129.82	1772.97	168.23	270

在 AS^2 的计算中,浅层滑坡汇水面积(A)由单位汇水面积(A_s)乘滑坡后缘宽度得到,浅沟与切沟的汇水面积由单位汇水面积乘沟道宽度得到。由表 1 可知,研究

区浅层滑坡 AS^2 分布范围为 269.1~5 703.2 m^2 ,平均值为 1 772.97 m^2 ,且集中分布在 500~2 500 m^2 内;Wu 等^[8]提出切沟 AS^2 范围为 41~814 m^2 ,平均

值为 $270 \text{ m}^{2[8]}$ 。Cheng 等^[9]提出浅沟 AS^2 范围为 $4.74 \sim 892.66 \text{ m}^2$, 平均值为 $168.23 \text{ m}^{2[9]}$ 。由此可知, 浅沟起动能量值小于切沟, 浅沟侵蚀的形成需要的能量更少, 且二者起动能量值均明显低于浅层滑坡, 与前文中关于阈值 k 的分析吻合。总体而言, AS^2 在不同地区之间存在差异, 主要体现在不同地区的侵蚀方式(如浅沟侵蚀、切沟侵蚀、河道侵蚀)有所不同^[9]。侵蚀方式越剧烈, 切割越强烈, 启动能量值越高。由研究区浅层滑坡的计算结果可知, 在启动能量值方面, 浅沟 < 切沟 < 浅层滑坡侵蚀。

2.2 浅层滑坡临界起动条件影响因素分析

研究选取中寨村、刘家河、上窑 3 个滑坡较为发育的地区, 探究不同土地利用类型、不同植被种类(油松和落叶松)和土壤质地对滑坡面积—坡度关系的影响。由表 2 可知, 中寨村、刘家河和上窑 3 地分别以耕地、油松林和落叶松林为主。饱和导水率中寨村最

低, 只有 2.03 mm/h , 日本落叶松林饱和导水率平均值为 7.58 mm/h , 油松林 12.41 mm/h 。中寨村土壤容重最高, 其次是上窑, 刘家河最低。

根系分布方面, 油松和日本落叶松根系均在 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 深土层内集中分布, $30 \sim 50 \text{ cm}$ 范围内日本落叶松根系随土层深度增加明显减少, 油松根系分布随土层深度无显著差异, 油松根系分布比日本落叶松更加深(图 5a)。树种特征方面, 油松胸径波动范围为 $(12.03 \pm 3.47) \text{ cm}$, 树高为 $(10.20 \pm 1.26) \text{ m}$, 日本落叶松胸径为 $(7.11 \pm 2.42) \text{ cm}$, 树高为 $(9.12 \pm 2.18) \text{ m}$ 。由以上数据可知, 油松胸径、树高和根系分布深度明显大于日本落叶松。

土壤质地方面, 根据美国制土壤粒径分级标准, 按照黏粒($0 \sim 0.002 \text{ mm}$)、粉粒($0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$)、沙砾($0.05 \sim 2 \text{ mm}$)的百分含量对土壤质地进行划分, 结果显示, 3 个研究区均为粉砂质壤土, 土壤质地相同(图 5b)。

表 2 中寨村、刘家河和上窑林地参数

研究区	土地利用类型	植被类型	饱和导水率/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	土壤质地	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均 胸径/cm	平均 树高/cm
中寨村	农地		2.03	粉砂质壤土	1.55		
上窑	林地	落叶松	7.58	粉砂质壤土	1.45	7.11 ± 2.42	9.12 ± 2.18
刘家河	林地	油松	12.41	粉砂质壤土	1.44	12.03 ± 3.47	10.20 ± 1.26

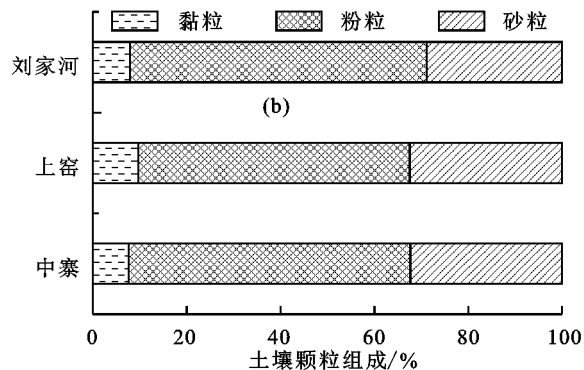
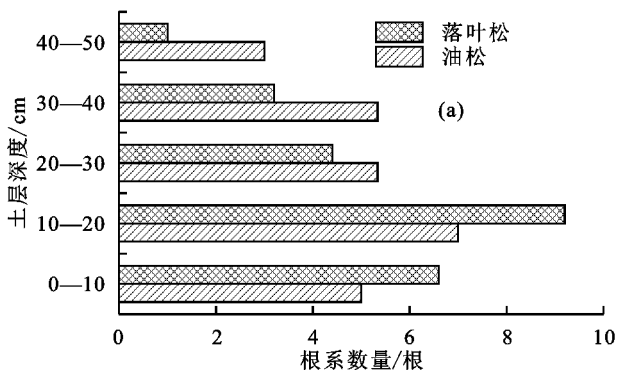


图 5 不同土层深度根系数量和研究区土壤颗粒组成

图 6 以幂率函数的形式显示拟合的汇水面积—坡度关系。刘家河为 $S = 6.14A_s^{-0.36}$ ($R^2 = 0.56$), 上窑为 $S = 3.58A_s^{-0.27}$ ($R^2 = 0.47$), 中寨村为 $S = 2.70A_s^{-0.24}$ ($R^2 = 0.53$)。侵蚀阻力由低到高依次为中寨村 < 上窑 < 刘家河。将油松和落叶松相比较发现, 油松的侵蚀阻力大于落叶松(图 5), 体现在油松林处浅层滑坡的起动坡度 ($\bar{S} = 1.50 \text{ m/m}$) 和单位汇水面积 ($\bar{A}_s = 74.37 \text{ m}^2/\text{m}$) 均高于日本落叶松林 ($\bar{S} = 1.29 \text{ m/m}$, $\bar{A}_s = 63.26 \text{ m}^2/\text{m}$)。

土地利用类型显著影响侵蚀过程, 频繁强烈的农事干扰会导致坡耕地水土流失剧烈, 有机质减少, 土壤饱和导水率降低, 增加滑坡发生的风险^[20]。中寨村土地利用类型以耕地为主, 梯田分布在丘陵斜坡地

带, 分布有少量落叶松, 土壤密度高, 渗透性差, 饱和导水率低, 从而侵蚀阻力最低。

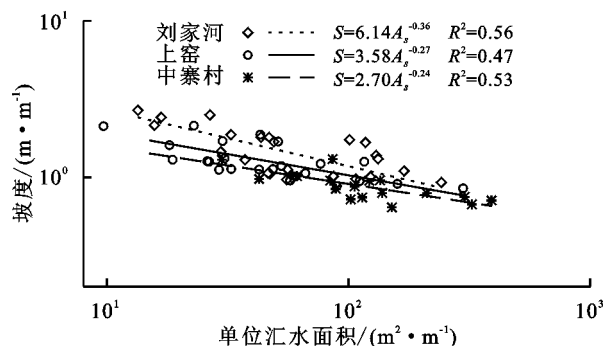


图 6 刘家河、上窑和中寨村汇水面积—坡度关系

有研究^[23-24]发现, 植被的生长发育显著提高沟道侵蚀阻力, 特别是数量庞大且密集根系, 通过增强

土壤的抗冲力和提高土壤的渗透性来强化土壤的抗侵蚀阻力。由表2和图5可知,油松在胸径、树高和根系分布深度等方面明显大于日本落叶松,油松密集的根系显著提高土壤的抗侵蚀能力,从而提高面积—坡度关系中的抗侵蚀阻力 k 值。

当前期降水时间较长时,特别是“7·25”灾害前长达1多个月的前期降水,大量的雨水通过粉质黏土孔隙渗入坡体,填充土壤颗粒的孔隙水压力上升,黏粒含量越高的土壤,其内部的孔隙水压力越无法及时消散,最终导致滑坡的启动^[25]。由图5b可知,油松林黏粒含量为7.9%,日本落叶松黏粒含量为9.64%,耕地黏粒含量为7.2%,虽然中寨村黏粒含量在三者中最低,但其饱和导水率最小,土壤容重最大,推测耕种活动产生的扰动强度使中寨村土壤更加密实,土壤颗粒之间的孔隙较小,渗透性差,导致其孔隙水压力消散慢。相比于日本落叶松林地,油松林黏粒含量更低,孔隙水压力消散更为快速。油松林滑坡较大的启动坡度和汇水面积意味着滑坡的启动需要更陡的坡度和更多的渗流汇聚到不稳定的斜坡上。

此外,指数 b 是反映汇水面积相对重要性的指标,可以指示一个地区的主要侵蚀营力。当 $b < 0.2$ 时,主要侵蚀过程为地下水流引发的沟壁崩塌;当 $b > 0.4$ 时,主要侵蚀过程为地表水流侵蚀;当 b 值分布居中时,主导过程包括部分地表径流侵蚀、管蚀和山体滑坡^[6]。在本研究中,中寨村、上窑和刘家河 b 值分别为0.24,0.27,0.36,均分布在0.2~0.4的范围内。可以看出3个地方的主要侵蚀形式均为山体滑坡。

3 讨论

常量 k 由环境因子决定,与土地利用、土壤、降雨和植被等因素相关, k 值越大,说明该地区越容易发生沟道侵蚀。典型黄土区,浅沟 k 值一般在0.5~1.0,切沟在1.0~2.0^[5,8-9,15],研究区浅层滑坡 k 值明显高于典型黄土区侵蚀沟。Montgomery等^[7]最初提出 AS^2 的概念,将其作为沟道侵蚀中确定沟头位置的关键指标,对美国高山峡谷区的河道侵蚀进行研究发现, AS^2 分布在500~4 000 m^2 。文中65处滑坡的 AS^2 值在269.1~5 703.2 m^2 ,与河道侵蚀的启动能量值接近,远高于黄土高原坡面漫流形成的浅沟与切沟启动能量值,验证了不同的侵蚀方式对 AS^2 有较强的影响。另外,数字高程模型的分辨率也对计算结果产生一些影响,研究区DSM的像素为0.25 m^2 ;而Montgomery等^[7]的研究中像素为20 m^2 ;Wu等^[8]和Cheng等^[9]的研究中,像素为4 m^2 。

像素大小影响坡度和汇水面积计算的精度,虽然存在这些影响因素,但 AS^2 仍然是确定沟头出现位置的重要指标。

中寨村、刘家河和上窑的调查在周围十几公里范围内,空间范围有限,降水、岩性与植被覆盖条件可以认为是相同的。因此,浅层滑坡发育的 A_s-S 关系的差异主要来自于土地利用类型、植被类型和土壤质地。在不同的土地利用类型中,农耕地最易发生侵蚀,其次是牧草地和林地^[26]。随着水体入渗型滑坡研究的深入,大量的野外调查以及试验研究表明,水体入渗产生的渗透力以及孔隙水压力的迅速上升是浅表层滑坡的最主要诱发因素^[27]。在滑坡启动的过程中,坡面上土层受到上部滑坡体强烈而快速的剪切运动时,其内部超孔隙水压力将快速增大。当土壤渗透性能较低时,土粒堵塞孔隙内通道,导致孔隙水压力维持在一个较高的水平且不容易消散,其转化为有效应力的速度减慢,抗剪强度降低,从而更易产生滑坡^[28]。相反,在渗透性高,富含大孔隙的土壤中,坡体整体渗透性强,持水能力差。水流直接渗入土体,然后从坡脚排除,坡体含水率低,孔隙水压力小,致使坡体自身稳定性强,不易产生滑坡。滑坡的侵蚀机制在这一方面与坡面漫流形成的侵蚀沟有所不同,推测这也是油松林的侵蚀阻力大于落叶松林的原因之一。

4 结论

(1)浅层滑坡数据点在双对数坐标系下,单位汇水面积与坡度呈现出幂率函数形式的递减关系,其临界启动模型为 $S = 3.50A_s^{-0.34}$,阈值 k 为3.50,高于典型黄土高原侵蚀沟的阈值(0.96,1.43,1.54)。浅层滑坡发生所需的平均单位汇水面积为89.08 m^2/m ,低于浅沟($\bar{A}_s = 920.93 m^2/m$)与切沟($\bar{A}_s = 1 129.82 m^2/m$);平均坡度为1.26 m/m ,高于浅沟($\bar{S} = 0.35 m/m$)和切沟($\bar{S} = 0.46 m/m$),归因于浅层滑坡与侵蚀沟在形成方式和地形特征等方面的不同。

(2)汇水面积和临界坡度平方的乘积(AS^2)作为沟头启动的重要能量指标,在不同侵蚀方式中存在明显差异。研究区浅层滑坡 AS^2 值在269.1~5 703.2 m^2 ,平均值为1 772.97 m^2 ,该值远高于黄土高原地区切沟、浅沟的启动能量值,接近河道侵蚀启动能量值。

(3)土地利用类型、植被类型和土壤质地对面积—坡度关系有较为明显的影响,农耕地引发滑坡的侵蚀阻力小于林地,油松林引发滑坡的侵蚀阻力高于日本落叶松林,体现在油松林引发滑坡所需的启动坡度和汇水面积均高于日本落叶松林。

参考文献:

- [1] Guan Y B, Yang S T, Zhao C S, et al. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205(1): 1-13.
- [2] Montgomery D R, Dietrich W E. Landscape dissection and drainage area-slope thresholds[M]. Wiley, Chichester Process Models and Theoretical Geomorphology, 1994: 221-245.
- [3] Montgomery D R, Dietrich W E. Where do channels begin? [J]. Nature, 1988, 336(6196): 232-234.
- [4] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 4449-4454.
- [5] 刘欣, 王春梅, 庞国伟, 等. 基于坡度-汇水面积关系的黄土浅沟与切沟沟头形成敏感区模拟[J]. 山地学报, 2020, 38(5): 658-667.
- [6] Dong Y F, Xiong D H, Su Z A, et al. Critical topographic threshold of gully erosion in Yuanmou Dry-hot Valley in Southwestern China[J]. Physical Geography, 2013, 34(1): 50-59.
- [7] Montgomery D R, Dietrich W E. Channels initiation and the problem of landscape scale[J]. Science, 255(5046): 826-830.
- [8] Wu Y Q, Cheng H. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system [J]. Catena, 2005, 63(2/3): 154-166.
- [9] Cheng H, Zou X Y, Wu Y Q, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(1): 4-14.
- [10] 郭富赞, 孟兴民, 黎志恒, 等. 天水市“7·25”群发性地质灾害特征及成因[J]. 山地学报, 2015, 33(1): 100-107.
- [11] 于国强, 张茂省, 胡炜, 等. 天水市“7·25”群发性山洪地质灾害发育特征及成因分析[J]. 西北地质, 2014(3): 185-191.
- [12] Wang H J, Sun P, Zhang S, et al. Evolutionary and dynamic processes of the Zhongzhai landslide reactivated on October 5, 2021, in Niangniangba, Gansu Province, China[J]. Landslides, 2022, 19(12): 2983-2996.
- [13] 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, 2021, 80(1): 1-14.
- [14] Zhang S, Sun P, Ren J, et al. Successful emergency evacuation from a catastrophic loess landslide reactivated by the torrential rain in October 2021 in Tianshui, Gansu, NW China[J]. Geoenvironmental Disasters, 2022, 9(1): 1-10.
- [15] 丁晓斌, 郑粉莉, 王彬, 等. 子午岭地区坡面浅沟侵蚀临界模型研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 122-125, 201.
- [16] 李浩, 杨薇, 刘晓冰, 等. 沟蚀发生的地貌临界理论计算中数据获取方法及应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 127-133.
- [17] Torri D, Poesen J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 130: 73-85.
- [18] Godt J W, McKenna J P. Hydrological response of hillside materials to infiltration: Implications for shallow landsliding in the Seattle area[J]. Landslides and Engineering Geology of the Seattle, Washington, area, Reviews in Engineering Geology, 2008, 20: 121-135.
- [19] Baum R L, Godt J W, Savage W Z. Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F3): 1-26.
- [20] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 1-13.
- [21] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956(2): 99-115.
- [22] 刘宝元, 杨扬, 陆绍娟. 几个常用土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 9-16.
- [23] Sun L, Zhang G H, Liu F, et al. Effects of incorporated plant litter on soil resistance to flowing water erosion in the Loess Plateau of China[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 238-247.
- [24] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机制初步研究[J]. 中国科学, 1992, 35(3): 254-259.
- [25] 赵普意. 黏粒含量对浅层滑坡形成机制及运移范围影响[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [26] 张光辉, 杨扬, 符素华, 等. 切沟侵蚀预报研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2022, 37(6): 551-562.
- [27] Anderson S A, Sitar N. Analysis of rainfall-induced debris flows[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(7): 544-552.
- [28] 周公旦. 孔隙水压力在滑坡泥石流起动和运动中的作用[J]. 自然杂志, 2014, 36(5): 325-335.