

晋西黄土区极端降雨后浅层滑坡调查及影响因素分析

李阳¹, 张建军^{1,2,3,4}, 魏广阔¹, 胡亚伟¹, 赵宇辉¹, 唐鹏¹

(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 吉县 042200;
3.北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室,北京 100083;4.北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心,北京 100083)

摘要: 极端降雨引发的浅层滑坡,造成了严重的环境破坏与社会经济损失。为探究极端降雨条件下土地利用、植被类型和地形因素对浅层滑坡的影响,通过对山西省吉县蔡家川流域2021年10月3—6日极端降雨引发的浅层滑坡进行实地调查,分析了极端降雨的特征与过程,不同土地利用和植被状况条件下、不同地形条件下浅层滑坡的数量与破损面积。结果表明:(1)极端降雨降雨量为年平均降雨量的31.2%,达到了161.3 mm,降雨历时84 h,峰值降雨强度7 mm/h,平均降雨强度2.1 mm/h,发生该种程度降雨的频率为0.16%,为625年一遇的极端降雨。(2)蔡家川流域内的农地小流域、人工林小流域和次生林小流域共计发生浅层滑坡479处,破损面积达183 881 m²,90%的浅层滑坡面积小于885 m²。(3)单位面积上浅层滑坡的数量与破损面积均表现为农地小流域(214个/km²,109 241 m²/km²)>人工林小流域(163个/km²,48 779 m²/km²)>次生林小流域(42个/km²,17 176 m²/km²),在小流域尺度上森林植被对浅层滑坡的防治作用显著高于农地,且次生林地预防浅层滑坡的作用优于人工林地。(4)浅层滑坡发生的坡面坡度为10°~80°,浅层滑坡数量与破损面积均随着坡度的增大而增大,在40°~50°达到峰值,坡度>50°后,浅层滑坡数量与破损面积随坡度增大而减少,坡度是影响浅层滑坡的主导因素。(5)浅层滑坡发生在坡向为22.5°~337.5°的坡面上,浅层滑坡数量和破损面积随坡向变化并未表现出明显的规律性,坡向对浅层滑坡的影响不大。

关键词: 极端暴雨; 浅层滑坡; 土地利用; 地面植被; 坡度; 坡向; 晋西黄土区

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)05-0044-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.007

Investigation of Shallow Landslide After Extreme Rainfall and Analysis of Its Influencing Factors in the West Shanxi Loess Region

LI Yang¹, ZHANG Jianjun^{1,2,3,4}, WEI Guangkuo¹, HU Yawei¹, ZHAO Yuhui¹, TANG Peng¹

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Ji County Station in Shanxi, Chinese National Ecosystem Research Network, Jixian, Shanxi 042200; 3.State Forestry Administration Key Laboratory of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 4.Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Shallow landslides caused by extreme rainfall have resulted in serious environmental damage and losses. In order to explore the effects of land use, vegetation types and topographic factors on shallow landslides under extreme rainfall conditions, this study conducted a field investigation on shallow landslides caused by extreme rainfall from October 3 to 6, 2021 in Caijiachuan Watershed of Ji County, Shanxi Province, and analyzed the characteristics and process of extreme rainfall, the number and damaged area of shallow landslide under different land uses, vegetation and terrain conditions. The results showed that: (1) The extreme rainfall was 31.2% of the annual average rainfall, reaching 161.3 mm, the duration of rainfall was 84 hours, the peak rainfall intensity was 7 mm/h, the average rainfall intensity was 2.1 mm/h, and the frequency of rainfall of this degree was 0.16%. (2) A total of 479 shallow landslides occurred in the small watershed of farmland, plantation and secondary forest in Caijiachuan basin, with the damage area of 183 881 m², and 90% of the shallow landslide area was less than 885 m². (3) The number and damage area of shallow land-

收稿日期:2022-01-21

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0104700)

第一作者:李阳(1999—),男,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:354959144@qq.com

通信作者:张建军(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持与森林水文研究。E-mail:zhangjianjun@bjfu.edu.cn

slides per unit area were as follows: small watershed of agricultural land ($214 / \text{km}^2$ and $109\,241 \text{ m}^2 / \text{km}^2$) $>$ small watershed of plantation forest ($163 / \text{km}^2$ and $48\,779 \text{ m}^2 / \text{km}^2$) $>$ small watershed of secondary forest ($42 / \text{km}^2$ and $17\,176 \text{ m}^2 / \text{km}^2$). At the small watershed scale, the effect of forest vegetation on shallow landslide prevention was significantly higher than that of agricultural land, and the effect of secondary forest was better than that of artificial forest. (4) The slope of shallow landslide was $10^\circ \sim 80^\circ$, the number of shallow landslide and the damaged area increased with the increases of slopes, and reached the peak in the range of $40^\circ \sim 50^\circ$. When the slope was greater than 50° , the number of shallow landslide and the damaged area decreased with the increases of slopes. Slope was the dominant factor affecting shallow landslide. (5) Shallow landslides mainly occurred on the slope with slope aspect of $22.5^\circ \sim 337.5^\circ$. The number and damage area of shallow landslides did not show obvious regularity with slope aspect, and slope aspect had little influence on shallow landslides.

Keywords: extreme rainstorm; shallow landslide; land use; ground vegetation; slope; slope direction; West Shanxi Loess Region

降雨是导致浅层滑坡灾害的直接诱发因素之一^[1]。近年来,气候变化导致的极端降雨事件时有发生,引发的浅层滑坡、泥石流等灾害十分严重,不仅造成了严重的水土流失,更严重威胁生命财产安全^[2]。因此,研究暴雨等极端降雨条件下浅层滑坡的发生规律,对于开展浅层滑坡的灾害预警、风险评价与防治措施实施等方面具有重要实际意义。

植被对边坡稳定性起着重要作用,对于浅层滑坡的发生与发育具有显著影响^[3]。已有研究^[4]表明,植被通过根系网络固定土体,加强土体的抗剪强度,改善边坡的土体应力,降低土体中的集中应力,从而提高边坡稳定性,降低浅层滑坡发生的可能性,因此植物根系加固是一种具有潜在经济效益和环境友好的提高土体强度的方法。有大量植被覆盖的斜坡比没有植被覆盖的斜坡更稳定,也更不容易发生浅层滑坡^[5]。但也有研究表明,即使有良好的植被覆盖,在极端暴雨状况下也会发生浅层滑坡。如2016年7月17日,受持续性强降雨影响,湖南省湘西土家族苗族自治州古丈县墨戎镇龙鼻村附近植被状况良好的山体边坡发生滑坡灾害^[6];由于特大暴雨的发生,2013年7月21日,陕北富县地表覆盖度在90%以上的林区发生多处浅层滑坡^[7]。现有关于地面植被对浅层滑坡的影响多集中于单种植物根系对土体的力学效应^[5],较少探讨不同地面植被类型对浅层滑坡的影响,尤其基于小流域尺度分析植被类型对浅层滑坡的影响相对较少。

此外,地形对于浅层滑坡发生发展的影响同样十分重要^[8]。浅层滑坡因其是重力作用下的灾害,其发育和分布无疑受到地形的控制作用^[9]。坡度和坡向是2个反映地形的重要因素,对浅层滑坡的发生与发展具有一定的决定作用^[10]。坡度通过影响下滑力和岩土体的应力分布而对浅层滑坡有控制性作用,对于物

质组成均一、各向同性的坡体,浅层滑坡发育的可能性随着坡度的增大而增大^[11]。坡向则是通过影响太阳辐射和水分分布,进而影响降水、植被、侵蚀和风化作用等因素造成浅层滑坡的规律性分异^[12]。然而,目前关于地形对于浅层滑坡的影响研究多是利用浅层滑坡发生较为久远后的调查资料,这可能会导致那些在较短时间植被恢复良好的小规模浅层滑坡被忽略。极端降雨发生后,及时的浅层滑坡调查资料能更完全地反映地形因素对浅层滑坡的影响,而这种研究相对较少。

为此,本研究基于2021年10月3—6日山西省临汾市吉县发生的极端降雨事件,于10月14—21日利用无人机对吉县蔡家川流域的浅层滑坡情况进行实地调查,分析浅层滑坡数量、规模及分布规律,探讨浅层滑坡与植被类型、地形因素的关系,以期为极端暴雨条件下黄土高原地区浅层滑坡预警预防提供参考。

1 研究区概况

山西省临汾市吉县属温带大陆性季风气候,其特点是春冬干旱少雨,夏秋降雨集中。多年平均气温 10.5°C , 极端最低气温 -21.3°C ; 极端最高气温 39.7°C 。年平均降水量 520.3 mm , 年平均降水时间为109天,6—10月的降水量占全年的75%以上。地势东北高,西南低。东部和北部为吕梁山脉西麓,峰峦叠嶂。向西、向南逐渐过渡到黄土丘陵沟壑区,地表破碎,沟壑纵横。

本研究选择山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站的蔡家川流域作为调查对象,流域面积 34.23 km^2 , 东西走向,地理坐标 $110^\circ 39' 45'' \sim 110^\circ 47' 45'' \text{ E}$, $36^\circ 14' 24'' \sim 36^\circ 18' 23'' \text{ N}$, 属于典型的梁状丘陵沟壑区。海拔 $900 \sim 1\,513 \text{ m}$ 。土壤以褐土为主,微碱性,抗蚀性差,黄土母质,土层厚度几十至百米,土质较均匀。流域内土地利用类型以林地、灌木林地、草地、农地为主,森林覆盖率达80%以上。流域

上游主要为由辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、山杨(*Populus davidiana*)、黑桦(*Betula dahurica*)、北京丁香(*Syringa pekinensis*)等组成的天然次生林,中游为由刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)组成的人工林,下游为荒草地和农地^[13]。

2 材料与方法

2.1 降雨数据的采集

本次调查的降雨数据来源于山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站在流域内布设的 10 个雨量站(图 1),雨量计为翻斗式自记雨量计,精度为 0.2 mm。

2.2 浅层滑坡野外调查

浅层滑坡调查于 2021 年 10 月 14—21 日在蔡家

川流域内进行,选择了次生林小流域、人工林小流域和农地小流域共 3 个不同土地利用类型的小流域(图 1)作为调查对象,3 个小流域的基本情况见表 1。

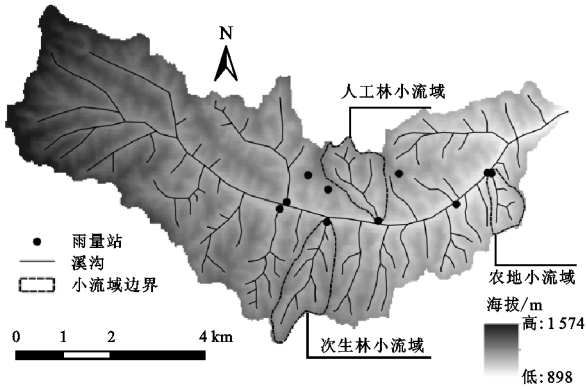


图 1 蔡家川流域概况

表 1 小流域概况

小流域类型	土地利用类型	流域面积/km ²	植被覆盖率/%
农地小流域	以水平梯田、果园为主	0.71	85
人工林小流域	以人工刺槐林、油松林、侧柏林为主	1.50	92
次生林小流域	以封禁天然次生林为主	1.93	99

使用搭载高精度摄像头的大疆悟二型无人机对 3 个小流域进行航拍,通过野外选点、相控点布设、航线规划、摄影测量作业、照片整理、影像建模、产品生成等环节,最终生成高分辨率的数字正射影像图和数字表面模型。通过无人机航拍(飞行高度 200 m)进行浅层滑坡的调查,采用对比暴雨前流域卫星遥感影像与暴雨后无人机航拍数字正射影像,识别流域内发生浅层滑坡的具体部位,解译浅层滑坡发生后植被的破坏面积,浅层滑坡在无人机照片上非常清晰,很容易识别和判断,浅层滑坡特征非常明显,滑坡破坏区域内色调较浅、发白发亮,且地表植被破坏情况严重,能够很清晰地解译出发生的浅层滑坡及破坏的区域。并且本次调查是在暴雨后 15 天内完成,这些浅层滑坡发生部位人很难到达,人类活动还没有对滑坡部位造成干扰。因此使用 Arcgis 软件采用目视解译的方法勾勒 3 个小流域内所发生的浅层滑坡,统计浅层滑坡的数量,计算浅层滑坡的破损面积(滑坡体发生、滑动及堆积整个过程所造成的地面植被破坏面积),并利用数字高程模型生成坡度图和坡向图。

为了验证目视解译方法的准确性,利用皮尺对流域内标志性建筑物和典型的浅层滑坡进行实地测量,同时采用目视解译方法计算该标志性建筑物和典型浅层滑坡的长度与面积,以此分析目视解译方法的误差,经对比分析得出目视解译的长度误差在 2.76% 以内,面积误差在 5.60% 以内,表明利用无人机拍摄的高分辨率影像采用目视解译的方法能够准确地计算出长度与面积。

3 结果与分析

3.1 蔡家川流域极端降雨事件特征

表 2 为各个雨量站对本次极端降雨的特征值。由表 2 可知,降雨量为 140.5~178.8 mm,平均值为 161.3 mm,为年平均降水量的 31.2%;降雨历时 84 h,平均降雨强度 2.1 mm/h,最大 10 min 降雨强度 33.6 mm/h,最大 30 min 降雨强度 25.2 mm/h。利用吉县 1960—2020 年 60 年降雨记录进行频率计算得出,本次降雨的频率为 0.16%,为 625 年一遇的极端暴雨。

由图 2 可知,从 10 月 3 日 0 时开始至 10 月 6 日 16 时结束,其间出现了 4 个峰值,分别出现在 10 月 3 日 7—9 时,10 月 4 日 6—7 时、10 月 4 日 18—20 时以及 10 月 5 日 22 时至 10 月 6 日 1 时,峰值降雨强度达到 7 mm/h。

3.2 浅层滑坡的统计特征

通过无人机拍摄的影像对 3 个不同土地利用类型小流域内发生的浅层滑坡进行目视解译得出,本次极端降雨期间共发生 479 个浅层滑坡,破损总面积达到 183 881.3 m²,规模最小的仅为 12.0 m²,规模最大的为 5 969.8 m²,平均面积为 383.9 m²。图 3 为浅层滑坡破损面积的累积频率曲线,由图 3 可知,80% 的浅层滑坡破损面积在 529 m² 以下,90% 的浅层滑坡破损面积在 885 m² 以下。

3.3 浅层滑坡与流域土地利用类型的关系

为了消除小流域面积差异的影响,选择使用数量密度与面积密度反映单位面积上发生浅层滑坡的数量与

破损面积。由表 3 可知,浅层滑坡的数量密度与面积密度均表现为农地小流域($214\text{ 个}/\text{km}^2, 109\,241.3\text{ m}^2/\text{km}^2$) $>$ 人工林小流域($163\text{ 个}/\text{km}^2, 48\,779.7\text{ m}^2/\text{km}^2$) $>$ 次生林小流域($42\text{ 个}/\text{km}^2, 17\,176.3\text{ m}^2/\text{km}^2$),可以认为以农地为主要土地利用的小流域内发生的浅层滑坡数

量明显多于人工林小流域和次生林小流域,而且农地小流域内发生的浅层滑坡的破损面积也明显大于人工林小流域和次生林小流域。这表明在小流域尺度上森林对预防浅层滑坡的积极作用显著高于农地,且次生林对浅层滑坡的预防作用优于人工林。

表 2 蔡家川流域极端降雨事件特征

雨量站	海拔/m	降雨量/ mm	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨历时/ h	最大 10 min 降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	最大 30 min 降雨强度/ (mm·h ⁻¹)
1	1005	140.5	1.7	84.2	13.8	10.6
2	1041	144.2	1.7	84.2	16.8	12.4
3	1054	144.9	1.7	84.3	15.6	12.4
4	1055	153.3	1.8	84.2	15.6	12.4
5	950	160.4	1.9	84.2	23.4	7.8
6	1140	166.4	1.9	85.7	19.2	10.8
7	1173	173.6	2.0	85.4	20.4	13.2
8	945	175.0	2.1	84.0	33.6	25.2
9	1255	175.6	2.1	85.2	16.8	11.6
10	962	178.8	2.1	86.3	25.2	18.8
均值	1058	161.3	1.9	84.8	20.0	13.5

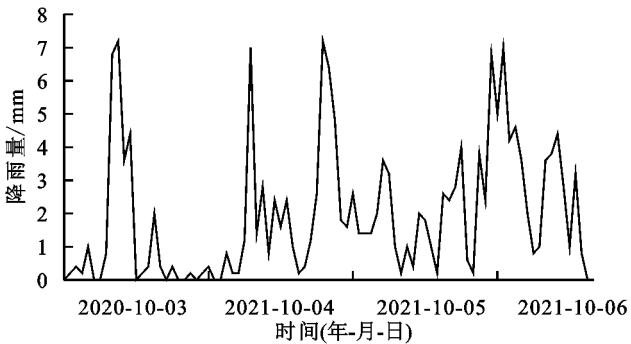


图 2 极端降雨过程

农地小流域内浅层滑坡的破损面积最高值达 $5\,969.8\text{ m}^2$, 平均值为 510.3 m^2 , 均大于次生林小流域和人工林小流域,说明农地小流域内发生的浅层滑坡不仅数量多,而且规模较大。本次调查中浅层滑坡破损面积的最小值为 12.0 m^2 ,出现在人工林小流域内,人工林小

流域内浅层滑坡破损面积的平均值也低于农地小流域和次生林小流域,表明人工林能有效降低流域内浅层滑坡的数量和规模。次生林小流域内浅层滑坡的数量密度和面积密度均为 3 个小流域中最小,说明次生林对极端暴雨引发的浅层滑坡具有显著的预防效果。

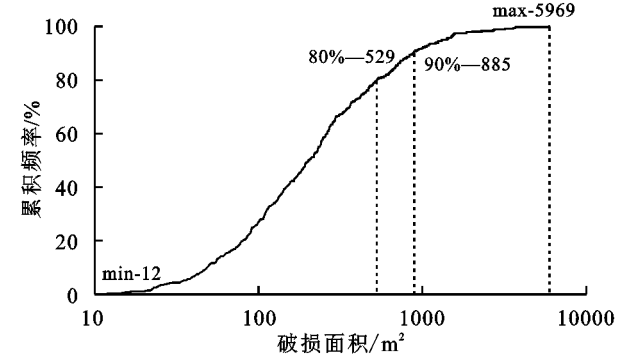


图 3 浅层滑坡破损面积累积频率曲线

表 3 不同类型小流域内浅层滑坡特征

小流域 类型	浅层滑坡 数量/个	数量密度/ (个·km ⁻²)	浅层滑坡破损面积/m ²					面积密度/ (m ² ·km ⁻²)
			总面积	最小值	最大值	平均值	标准差	
农地	152	214	77561.3	17.9	5969.8	510.3	734.2	109241.3
人工林	245	163	73169.5	12.0	3699.4	298.7	431.2	48779.7
次生林	82	42	33150.3	23.2	3203.4	404.3	511.5	17176.3

3.4 地形与浅层滑坡的关系

由图 4 可知,农地小流域内发生浅层滑坡的坡度为 $10^{\circ}\sim60^{\circ}$,其中 $40^{\circ}\sim50^{\circ}$ 的坡面上浅层滑坡数量占比和浅层滑坡破损面积占比最大,分别为 45.4% 和 48.0% ;人工林小流域内发生浅层滑坡的坡度 $10^{\circ}\sim80^{\circ}$,其中 $40^{\circ}\sim50^{\circ}$ 的坡面上浅层滑坡数量占比和浅层滑坡破损面积占比最大为 56.7% 和 72.5% ;次生

林小流域内发生浅层滑坡的坡度为 $10^{\circ}\sim60^{\circ}$,其中 $40^{\circ}\sim50^{\circ}$ 范围内浅层滑坡数量占比和浅层滑坡破损面积占比最大为 39.0% 和 49.7% 。可见,研究流域内浅层滑坡的发生坡度均在 10° 以上,坡度 $<10^{\circ}$ 的坡面上均未发生浅层滑坡。在农地小流域、人工林小流域、次生林小流域内,浅层滑坡数量与浅层滑坡破损面积均随着坡度的增大先增大后减小,在 $40^{\circ}\sim50^{\circ}$ 的

坡面上浅层滑坡数量与破损面积均为最大,说明在该范围内,浅层滑坡最容易发生,即研究区内浅层滑

坡在不同土地利用类型的小流域中最容易发生

在 40°~50°的坡面上。

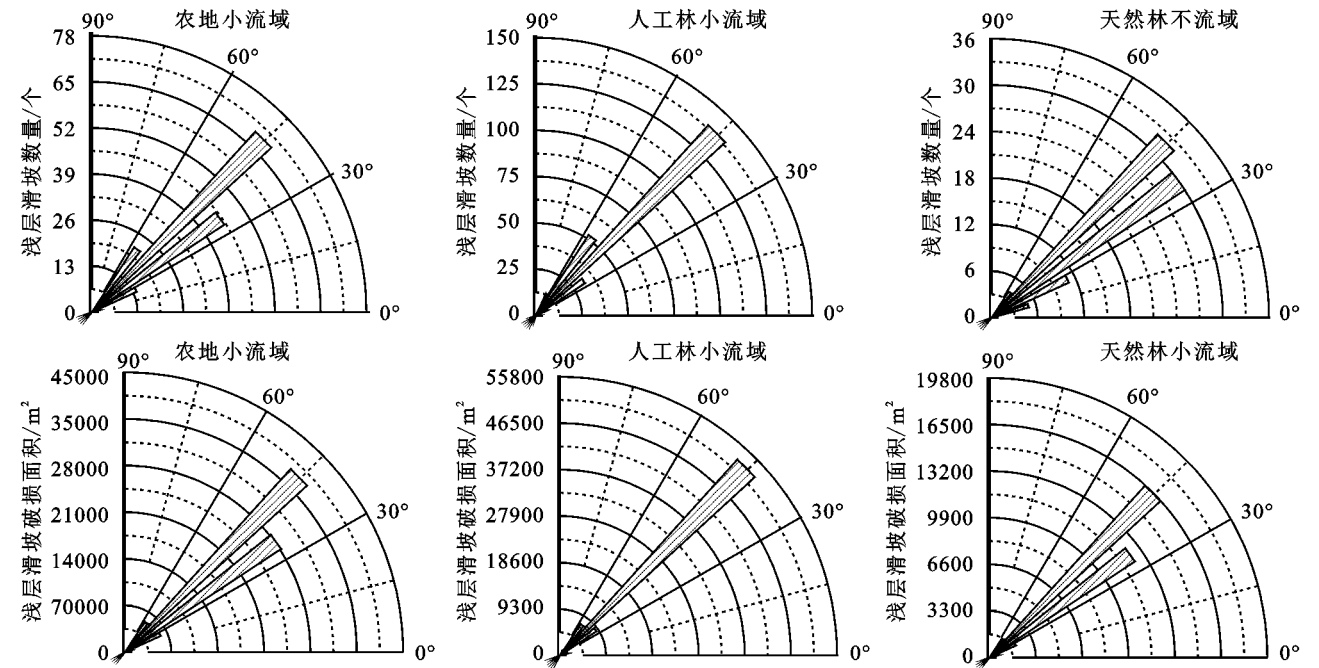


图 4 不同坡度下的浅层滑坡数量与面积

由图 5 可知,农地小流域内的浅层滑坡分布于 45°~315°的坡向范围内,浅层滑坡数量和浅层滑坡破损面积分别在 225.0°~247.5°和 90.0°~122.5°的坡向上达到峰值,占比 18.4%和 25.8%;人工林小流域内浅层滑坡分布于 45.0°~337.5°的坡向范围内,浅层滑坡数量和浅层滑坡破损面积分别在 157.5°~180.0°和 112.5°~135.0°的坡向上达到峰值,占比 14.7%和 18.8%;次生林小流域内浅层滑坡分布于 22.5°~337.5°的坡向范围内,浅层滑坡数量和浅层滑坡破损面积分别在 135.0°~157.5°和 112.5°~135.0°的范围内达到峰值,占比 17.1%和 23.2%。可以发现,农地小流域内坡向为 315.0°~45.0°的坡面、人工林小流域内 337.5°~45.0°的坡面、次生林小流域内 337.5°~22.5°的坡面均未发生浅层滑坡,即本次极端降雨过程中蔡家川流域内的阴坡均未发生浅层滑坡,这很可能是蔡家川流域为东西走向,阴坡多为支沟的沟头,占比较小所致。总体而言,蔡家川流域内的浅层滑坡数量和破损面积在随坡向变化上并未表现出明显的规律,说明坡向对于浅层滑坡发生的影响可能不大。

4 讨论

4.1 地面植被对浅层滑坡发生的影响

通常认为,地面植被的存在对于预防浅层滑坡的发生具有积极的作用。植被冠层对于诱发浅层滑坡的降雨有截留作用,通过林冠对降雨的再分配,减少了到达地面的雨水量,从而有可能降低浅层滑坡发生可能性^[14];同时植被的根系不仅能够团聚松散的土

体,还能够有效改善土体的力学性质,通过横向摩擦和纵向锚固作用增加土体的变形能力和抗剪强度,提高坡体的稳定性,降低浅层滑坡发生的可能^[15];此外,植被能作为浅层滑坡滑动路径上的拦挡物,能阻碍浅层滑坡的运动,控制浅层滑坡的破损面积。然而,由表 4 可知,本研究的 3 个小流域植被覆盖度均高于 85%,且都观察到大量浅层滑坡的发生,说明植被在防治浅层滑坡的作用上仍然具有一定限度。在植被状况良好的地区内发生的浅层滑坡的相关报道屡见不鲜,如 2019 年 7 月 23 日灾难性浅层滑坡发生于贵州水城县内较高植被覆盖区域^[16],2013 年 7 月 25 日甘肃天水市森林地区发生大规模群发性浅层滑坡^[17],2018 年 9 月 2 日云南文山州麻栗坡县上千余处浅层滑坡—泥石流灾害发生在高植被覆盖区^[18]。本次调查中也发现,发生浅层滑坡的坡面植被盖度均在 82%以上,可见植被的存在并不能完全杜绝浅层滑坡的发生。

但是,在小流域尺度上,土地利用类型/植被类型是影响浅层滑坡的重要因素。本次调查发现,不同土地利用类型的小流域内单位面积上的浅层滑坡数量和破损面积差异显著,其中农地小流域内单位面积上浅层滑坡数量最多,破损面积最大,人工林小流域单位面积上浅层滑坡数量居中,破损面积居中,而次生林小流域单位面积上浅层滑坡数量最少,破损面积最小。这表明不同土地利用类型对小流域内的浅层滑坡的发生起到决定性作用,尤其群落结构更为复杂、

物种多样性更为丰富的次生林对预防浅层滑坡的发生有更好的效果。有研究^[19]也指出,草本结合种植对于提高边坡稳定性的效果优于种植单一草本或乔木。草灌组合植被对边坡土体抗剪强度增强效果大于单一草本或灌木^[20]。这可能是次生林与人工林和农地相比,有着更为复合的林冠结构与根系系统,在

延缓雨水入渗、增加土体抗剪强度、阻拦浅层滑坡运动等方面的效果更佳。因此,在黄土高原通过实施大面积退耕还林工程,坡面植被得以有效恢复的同时,如何采取有效的植被管控措施,促进植被向结构复杂化、层次多样化、物种丰富化的方向演替,是在小流域尺度上防治极端暴雨引起浅层滑坡发生的有效措施。

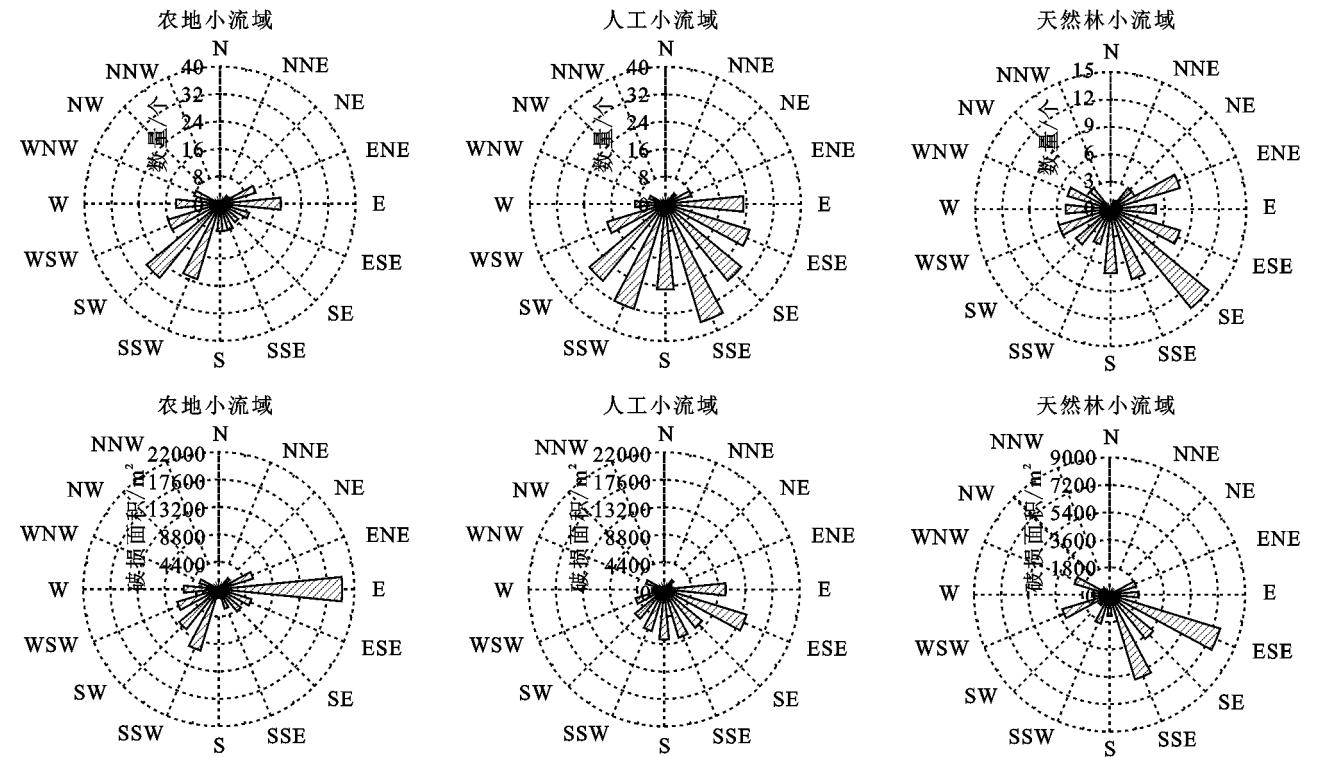


图 5 不同坡向下的浅层滑坡数量与面积

小流域类型	植被类型	覆盖度/%
农地小流域	以草本、灌木为主,伴有少量乔木	82~97
人工林小流域	以单种乔木为主,草本、灌木丰富	89~99
次生林小流域	多种乔木混交,草本、灌木丰富	94~99

4.2 地形对浅层滑坡发生的影响

坡度显著影响着岩石与土壤的应力分布,对于浅层滑坡的发生与发育具有重要作用^[21]。本研究在农地小流域、人工林小流域、次生林小流域内均观察到浅层滑坡的数量与破损面积随着坡度的增大先增加后减少,且峰值出现在 40°~50°的坡面上,说明极端暴雨引发的浅层滑坡主要发生在 40°~50°的坡面上。本次调查结果同其他关于坡度对浅层滑坡影响的研究结论有所不同,袁康等^[22]发现,浅层滑坡最易发生于 20°~30°的范围内,而吴昊等^[23]发现,浅层滑坡最易发生在 50°~60°的范围内,调查结果的差异可能是由于研究区域独特的地理位置、地貌条件,甚至诱发浅层滑坡的强降雨事件等多种因素导致。但这些研究^[21-23]都表明,浅层滑坡最易发生的坡度均处在研究区坡度分级的中间位置,这可能与浅层滑坡发生的力

学条件密切相关^[24]。本研究确定了晋西黄土区在极端降雨条件下浅层滑坡最易发生于 40°~50°的坡面上,因此需要着重做好该范围内的护坡措施以预防极端降雨诱发的浅层滑坡。

相较于坡度而言,本研究反映出坡向对浅层滑坡的影响较小,浅层滑坡数量与破损面积随坡向并没有明显的变化规律。与坡度对浅层滑坡发生的直接影响不同,坡向是通过影响太阳辐射和水汽分布,造成土壤、地表植被的和降雨的差异性,进而间接影响浅层滑坡的发生与发育过程^[25]。在本研究中,研究区域较小,坡向对于土壤、地表植被和降雨等方面的影响并不显著,对浅层滑坡的间接影响较小,不是影响浅层滑坡的主导因素。

5 结论

(1)极端降雨降雨量为年平均降雨量的 31.2%,达到了 161.3 mm,降雨历时 84 h,峰值降雨强度 7 mm/h,平均降雨强度 2.1 mm/h,发生该种程度降雨频率为 0.16%,为 625 年一遇的极端暴雨。

(2)蔡家川流域内的农地小流域、人工林小流域

和次生林小流域共计发生浅层滑坡 479 处, 破损面积达 183 881.3 m², 80% 的浅层滑坡破损面积在 529 m² 以下, 90% 的浅层滑坡面积小于 885 m²。

(3) 单位面积上浅层滑坡的数量与破损面积均表现为农地小流域(214 个/km², 109 241 m²/km²) > 人工林小流域(163 个/km², 48 779 m²/km²) > 次生林小流域(42 个/km², 17 176 m²/km²), 在小流域尺度上森林植被对浅层滑坡的防治作用显著高于农地, 且次生林地预防浅层滑坡的作用优于人工林地。

(4) 浅层滑坡发生的坡面坡度为 10°~80°, 浅层滑坡数量与破损面积均随着坡度的增大而增大, 在 40°~50° 范围内达到峰值, 坡度大于 50° 后, 浅层滑坡数量与破损面积随坡度增大而减少, 坡度是影响浅层滑坡的主导因素。

(5) 浅层滑坡主要发生在坡向为 22.5°~337.5° 的坡面上, 浅层滑坡数量和破损面积随坡向变化并未表现出明显的规律性, 坡向对浅层滑坡的影响不大。

参考文献:

- [1] Gong Q H, Wang J, Zhou P, et al. A regional landslide stability analysis method under the combined impact of rainfall and vegetation roots in south China [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021(3):1-12.
- [2] 钟源, 李远耀, 殷坤龙, 等. 基于物理模型试验的厚层堆积层滑坡强降雨触发机制[J/OL]. *地球科学*: 1-14 [2022-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220113.1040.002.html>.
- [3] 刘亚斌, 胡夏嵩, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区草本和灌木组合根系分布特征及其增强土体抗剪强度效应[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(3):471-481.
- [4] Zhang D B, Zhang Y, Cheng T. Measurement of grass root reinforcement for copper slag mixed soil using improved shear test apparatus and calculating formulas [J]. *Measurement*, 2018, 118:14-22.
- [5] Su L J, Hu B L, Xie Q J, et al. Experimental and theoretical study of mechanical properties of root-soil interface for slope protection [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(11):2784-2795.
- [6] 王正宇, 樊辉. 降雨诱发浅层滑坡渐进破坏分析研究[J]. *贵州地质*, 2021, 38(4):443-448.
- [7] 韩勇, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系: 以富县“7·21”特大暴雨为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(15):4635-4643.
- [8] Peng J B, Wang S K, Wang Q Y, et al. Distribution and genetic types of loess landslides in China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 170:329-350.
- [9] 胡胜, 邱海军, 王新刚, 等. 基于高分辨地形的黄土滑坡特征参数提取及其应用意义[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(2):367-379.
- [10] Zhuang J Q, Peng J B, Wang G H, et al. Distribution and characteristics of landslide in Loess Plateau: A case study in Shaanxi province [J]. *Engineering Geology*, 2018, 236:89-96.
- [11] 熊海仙, 黄光庆, 宫清华, 等. 数字地形分析在滑坡研究中的应用综述[J]. *热带地理*, 2015, 35(1):139-146.
- [12] 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.
- [13] 胡亚伟, 孙若修, 申明爽, 等. 晋西黄土区土地利用方式对土壤 C:N:P 化学计量特征及土壤理化性质的影响[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(4):990-999.
- [14] 杨幼清, 胡夏嵩, 李希来, 等. 高寒矿区草本植物根系增强排土场边坡土体抗剪强度试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(6):105-113.
- [15] 秦明月, 郭剑, 邹强. 植被覆被条件下不稳定斜坡分布规律探究: 以大渡河流域为例[J/OL]. *工程地质学报*: 1-11 [2022-01-12]. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2020-667.
- [16] 李华, 史文兵, 朱要强, 等. 贵州省水城县“7·23”灾难性滑坡形成机制研究[J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(6):188-198.
- [17] 黄森, 崔素丽, 辛鹏, 等. 天水市“7.25”群发性浅层滑坡降雨阈值及空间分布研究[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(3):181-190.
- [18] Yang H J, Yang T Q, Zhang S J, et al. Rainfall-induced landslides and debris flows in Mengdong Town, Yunnan Province, China [J]. *Landslides*, 2020, 17(4):931-941.
- [19] 孙红, 吴刚, 李波, 等. 植被边坡稳定性的影响因素分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(增刊 2):1837-1841.
- [20] 许桐, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 西宁盆地黄土区荷载条件下植被护坡力学效应[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(2):142-151.
- [21] 胡胜, 邱海军, 王宁练, 等. 地形对黄土高原滑坡的影响[J]. *地理学报*, 2021, 76(11):2697-2709.
- [22] 袁康, 崔玉龙, 胡俊宏, 等. 2019 年“利奇马”台风暴雨滑坡分布分析: 以安徽省宁国市为例[J]. *陕西理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(3):74-81.
- [23] 吴昊, 裴向军, 崔圣华, 等. 强震山区滑坡发育分布的地形地质控制作用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(5):972-986.
- [24] 马蓓青, 杜玉鹏, 王怀星, 等. 持续降雨条件下黄土边坡稳定性试验研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5):50-56.
- [25] Xiong H X, Huang G Q, Gong Q H, et al. A review on application of digital terrain analysis in landslide researches [J]. *Tropical Georaphy*, 2015, 35(1):139-146.