

DOI: 10.5846/stxb202110313052

许阳光, 郭文召, 王文龙, 罗少辉, 陈卓鑫, 娄义宝, 费建坪. 极端降雨下黄土高原草被沟坡浅层滑坡特征及其对产流产沙的影响. 生态学报, 2022, 42(19): 7898-7909.

Xu Y G, Guo W Z, Wang W L, Luo S H, Chen Z X, Lou Y B, Fei J P. Characteristics of shallow landslides under extreme rainfall and their effects on runoff and sediment on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7898-7909.

# 极端降雨下黄土高原草被沟坡浅层滑坡特征及其对产流产沙的影响

许阳光<sup>1</sup>, 郭文召<sup>1,2</sup>, 王文龙<sup>1,2,\*</sup>, 罗少辉<sup>3</sup>, 陈卓鑫<sup>2</sup>, 娄义宝<sup>1</sup>, 费建坪<sup>1</sup>

1 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

3 青海省气象灾害防御技术中心, 西宁 810000

**摘要:** 植被恢复作为黄土高原防治水土流失的重要措施, 但极端降雨诱发的浅层滑坡在植被恢复的沟坡上频繁发生, 影响流域的产流产沙过程。基于野外原位模拟降雨试验, 在 60 mm/h 降雨强度下, 研究草被沟坡浅层滑坡发生特征及其发生前后的产流产沙差异。结果表明: (1) 极端降雨所诱发的草被沟坡上的浅层滑坡深度为 14—36 cm, 与自然强降雨所导致的浅层滑坡深度相贴合, 均是低于 50 cm。(2) 植被根系与土壤容重、孔隙度等土壤性质显著相关 ( $P < 0.05$ ), 致使滑坡面上、下层土壤物理性质差异显著 ( $P < 0.05$ )。由于土壤性质的差异, 在极端降雨下滑坡面上层土壤水分更快达到饱和 (饱和度  $> 90\%$ ), 导致浅层滑坡的发生。(3) 草被坡面浅层滑坡后的径流与产沙均显著增大 ( $P < 0.05$ )。三个小区的平均径流率在滑坡后增大了 4.0—13.1 倍, 其平均含沙量和产沙率在滑坡后分别增大了 9.9—54.9 倍和 70—841 倍。研究结果有助于加深了解植被沟坡的侵蚀产沙机理, 并为浅层滑坡防治提供科学依据。

**关键词:** 黄土高原; 浅层滑坡; 极端降雨; 径流; 侵蚀产沙; 植被恢复

## Characteristics of shallow landslides under extreme rainfall and their effects on runoff and sediment on the Loess Plateau

XU Yangguang<sup>1</sup>, GUO Wenzhao<sup>1,2</sup>, WANG Wenlong<sup>1,2,\*</sup>, LUO Shaohui<sup>3</sup>, CHEN Zhuoxin<sup>2</sup>, LOU Yibao<sup>1</sup>, FEI Jianping<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 Qinghai Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Xining 810000, China

**Abstract:** Vegetation restoration is an important measure to prevent and control soil erosion on the Loess Plateau, but shallow landslides induced by rainfall occur frequently on the revegetation slopes, affecting the process of runoff and sediment production in the watershed. In order to quantify the impact of shallow landslides on the process of runoff and sediment and to study the difference in runoff and sediment yield before and after the landslide occurrence, the field simulated rainfall tests were carried out on the grasscovered slope in the Wangdonggou watershed on the Loess Plateau. Based on the field investigation, each experimental plot was 25 m long and 2.5 m wide, and the slope was 35°—40°. Rainfall intensity was 60 mm/h, rainfall time was 90 min, representing a typical heavy rainfall on the Loess Plateau. After

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41907057, 42077079); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2021JQ-165); 中国博士后科学基金面上项目 (2020M683591)

收稿日期: 2021-10-31; 网络出版日期: 2022-10-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

the shallow landslide occurred, another rainfall test was carried out, and then the rainfall was stopped. Runoff and sediment samples were collected at the plot outlet at 5 minute intervals from the beginning of the rainfall. After the test, a 100 cm<sup>3</sup> ring knife was used to collect soil samples from different soil layers (10 cm, 30 cm, 50 cm) in the experimental plot to determine soil bulk density, soil porosity, and the saturated hydraulic conductivity. Three soil samples were taken from each layer. The drying method was used to determine the soil bulk density and soil porosity, and the doubling ring knife method was used to determine the saturated hydraulic conductivity. The results show that: (1) the depth of the shallow landslide on the grass cover slope induced by extreme rainfall was 14—36 cm, which was consistent with the shallow landslide depth (less than 50 cm) caused by the natural heavy rainfall. The shallow landslide depth was significantly correlated with the vegetation root depth. (2) There were significant differences in the physical properties between upper layer (rootsoil composite) and the lower layer of the landslide surface ( $P < 0.05$ ). The bulk density of the lower layer of the landslide surface was 20.6%—26.0% higher than the upper layer of the landslide surface. The saturated hydraulic conductivity of the upper layer of the landslide surface was 8.2—311 times higher than that of the lower layer of the landslide surface. Under extreme rainfall, the soil moisture on the surface of the landslide reached saturation sooner, and the soil moisture saturation exceeded 90%. (3) The runoff and sediment yield after a shallow landslide on the grass cover slope increased significantly ( $P < 0.05$ ). The average runoff intensity of the three plots was only 0.05—0.13 mm/min before the landslide, and as high as 0.62—0.69 mm/min after the landslide, an increase of 4.0—13.1 times. The average sediment concentration and average sediment yield rate were only 0.6—5.8 kg/m<sup>3</sup> and 0.03—0.26 g m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> before the landslide, respectively, and reached 30.0—111.5 kg/m<sup>3</sup> and 18.6—21.9 g m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> after the landslide, respectively, increasing of 9.9—54.9 times and 70—841 times. The research results are helpful to deepen the understanding of the erosion and sediment yield mechanism of revegetation slopes, and provide scientific basis for shallow landslide prevention and control.

**Key Words:** Loess Plateau; shallow landslide; extreme rainfall; runoff; sediment yield; vegetation restoration

黄土高原地区大规模实施退耕还林(草)工程已 20 余年,植被覆盖度从 1999 年的 32% 增加到 2018 年的 63%<sup>[1]</sup>,黄河输沙量从 1987—1999 年的 8.10 亿 t/a 减少到 2000—2018 年的 2.48 亿 t/a<sup>[2]</sup>。然而,当流域遭受极端降雨时,自然/人工恢复后的植被沟坡面极易发生大范围的浅层滑坡(“揭皮式”滑坡),对区域生态环境的影响不容忽视<sup>[3]</sup>。植被沟坡浅层滑坡是指植被覆盖度良好的陡坡面(简称植被坡面)上的浅表土体(根土复合体)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/滑流的现象。浅层滑坡是重力侵蚀的一种类型。由于黄土高原气候、地质地貌、地形及植被等条件的特殊性,该地区重力侵蚀频繁发生<sup>[4]</sup>。随着全球气候变暖,黄土高原地区极端降雨多发,更是加剧了浅层滑坡等重力侵蚀的发生。因此,黄土高原植被恢复能否有效控制浅层滑坡亟需进一步研究。

浅层滑坡通常是在高强度降雨或土壤长期饱和期间所触发,其深度通常小于 2 m,体积从几立方到几百立方米不等<sup>[5]</sup>。近年来约 50%—90% 的滑坡发生在雨季,并由降雨直接诱发<sup>[6-7]</sup>。如 2013 年 7 月黄土高原延安地区的长期降雨,造成了 8135 处深度不足 2.0 m 的浅层滑坡<sup>[8]</sup>,且极端降雨所诱发的浅层滑坡多发生在 25°—55° 的沟坡上<sup>[4]</sup>。植被并不能很好地抵御浅层滑坡<sup>[9]</sup>,当降水强度达到诱发滑坡的临界值时,植被反而会加剧滑坡的发生<sup>[10-11]</sup>。焦菊英等<sup>[9]</sup>通过调查延河流域极端降雨下的侵蚀产沙特征,发现滑坡侵蚀在总侵蚀量上占主导地位,占各小流域侵蚀量的 49.0%—88.5%。滑坡会导致土壤侵蚀速率显著增加<sup>[12-13]</sup>。周琪龙<sup>[14]</sup>认为浅层滑坡与土壤侵蚀具有一定的正相关性,在土壤侵蚀过程中起主导作用,控制着整个流域的侵蚀产沙量。赵超等<sup>[15]</sup>通过室内降雨模拟实验,研究发现重力侵蚀与形成高含沙水流关系密切。郭文召<sup>[16]</sup>通过野外模拟降雨实验,结合地貌仪监测,研究发现滑坡体越大,导致的侵蚀产沙量越大。

综上所述,学者们采用不同的方法在滑坡空间分布、影响因素、以及对侵蚀产沙的影响等方面已经做了一定研究,但仍存在研究的薄弱与不足之处。首先,对浅层滑坡的研究大量集中在通过实地调查研究滑坡的特征,诸如时空分布、规模大小、滑坡类型等,而针对浅层滑坡对径流泥沙动态过程的影响研究较为少见。其次,对于浅层滑坡与产沙过程关系的研究中,主要存在以下不足:一是通过室内降雨模拟实验,存在重塑下垫面与

自然下垫面的差异问题;二是在野外进行模拟实验,较小尺度的径流小区不能很好印证自然界中一般规模的浅层滑坡;三是相对于滑坡与产沙过程的关系研究,忽略了滑坡对产流过程的影响研究。本文在野外建立合适尺度径流小区的基础上,通过模拟降雨的试验方法对黄土高原小流域典型草被沟坡上所发生的浅层滑坡进行了研究,重点分析极端降雨诱发的浅层滑坡发生特征及径流泥沙在滑坡前后的差异及其原因,研究结果有助于加深了解植被沟坡的侵蚀产沙机理,并为浅层滑坡防治提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

中国科学院长武黄土高原农业生态试验站王东沟小流域(107°40'30"—107°42'30"E, 35°12'—35°16'N)位于黄土高原陕西省西部的咸阳市长武县,流域面积 8.3 km<sup>2</sup>。该小流域属于典型的黄土塬区,属大陆季风性气候,年均气温 9.1℃,多年平均降雨量 584 mm,多集中在 7—9 月份,且多以大雨和暴雨为主。该小流域的塬面和沟坡各占土地面积的 35% 和 65%,主要土壤类型为黑垆土(塬面)和黄绵土(沟坡),母质为中壤质马兰黄土。本试验小区布设在沟坡区域,土壤为黄绵土。自退耕还林(草)实施以后,塬面为粮果主要种植区,沟坡区植被恢复状况良好,植被类型以冰草(*Agropyron cristatum*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等草本植物和酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等灌木为主,伴有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杨(*Populus davidiana*)等乔木零星分布(多在沟底与沟坡较为平坦区域)。由于植被覆盖度的增加,水力侵蚀在该区得到了很好的控制,但重力侵蚀问题尤为突出,尤其在较强降雨过后,在沟坡区域时常发生浅层滑坡、崩塌等重力侵蚀现象。

### 1.2 试验设计

依据本团队在黄土塬区南小河沟流域(该流域与王东沟小流域气候、土壤、植被等因素相近,两者相距约 53.4km)和王东流域沟浅层滑坡的野外调查(图 1),发现浅层滑坡多发生在 30°—60°的灌草沟坡,浅层滑坡长度与宽度分别在 0—15 m 和 0—10 m 集中分布,其占比均达到 60%<sup>[3, 17]</sup>。结合在王东沟小流域所进行的植被调查,发现冰草和铁杆蒿为该流域分布广、数量多、具有代表性的草被类型。2013 年在小流域内的沟坡上已修建了 3 个 2.5 m×20 m 的径流小区(I、II、III),小区坡度为 35°—40°。小区内植被以铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)与冰草(*Agropyron cristatum*)为主,植被株高为 63—76 cm,覆盖度为 75%—85%。试验小区植被与土壤基本状况见表 1,植被根系垂直分布情况见表 2。降雨试验在 2020 年进行,草被已自然恢复 7 年。

表 1 试验小区植被与土壤基本指标

Table 1 Basic indices of vegetation and soil in test plots

| 试验小区<br>Test plots | 植物类型<br>Plant types | 平均株高<br>Average plant<br>height/cm | 盖度<br>Vegetation<br>coverage/% | 初始质量含水量<br>Initial mass water<br>content of soil/% | 粒径(mm)组成及质量百分数<br>Particle size (mm) composition<br>and mass percentage/% |            |       |
|--------------------|---------------------|------------------------------------|--------------------------------|--|---|------------|-------|
|                    |                     |                                    |                                |  | <0.005  | 0.005—0.05 | >0.05 |
| I                  | 铁杆蒿、冰草              | 63                                 | 78                             | 11.2   | 30.7  | 59.6       | 9.7   |
| II                 | 冰草、铁杆蒿              | 76                                 | 85                             | 14.5   | 33.1  | 59.2       | 7.7   |
| III                | 铁杆蒿、冰草              | 68                                 | 80                             | 18.9   | 31.6  | 59.5       | 8.9   |

I:1号小区 test plot 1;II:2号小区 test plot 2;III:3号小区 test plot 3

表 2 试验小区的植被根重密度垂直分布/(kg/m<sup>3</sup>)

Table 2 Vertical distribution of vegetation root weight density in test plots

| 试验小区<br>Test plots | 土层深度 Soil depth/cm |       |       |       |       |       |
|--------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 0—10               | 10—20 | 20—30 | 30—40 | 40—50 | 50—60 |
| I                  | 1.35               | 0.57  | 0.35  | 0.25  | 0.14  | 0.08  |
| II                 | 1.48               | 1.44  | 0.69  | 0.54  | 0.81  | 1.14  |
| III                | 1.64               | 0.71  | 1.51  | 0.53  | 0.45  | 0.14  |

基于黄土高原近几年极端降雨诱发滑坡事件的降雨数据:2013 年延安“7·3 暴雨”单日最大降雨量为 143.7 mm<sup>[18]</sup>;2013 年天水市 6 月 20 日最大 1 h 降水量为 65 mm,2 h 降水量达 115 mm,诱发重力侵蚀 95 处,浅层滑坡 65 处<sup>[19]</sup>;2017 年黄土高原绥德“7·26 暴雨”,李家河、李孝河两地雨量站雨强高达 72.4 mm/h 和 79 mm/h,李家峁站 8 小时累积降雨量高达 256.8 mm<sup>[20]</sup>。2018 年庆阳西峰“7·10 持续强降雨”14 天累计降雨量为 254.5 mm<sup>[3]</sup>。设计实验降雨雨强为 60 mm/h,单场降雨时间为 90 min,降雨场次间隔 8—12 h。

在小区周围利用钢管搭建降雨棚,在降雨棚上设置下喷式模拟降雨器。该降雨器由降雨喷头、PPR 管、水泵、水池等组成,可通过阀门调节雨强大小和控制降雨时间。降雨器布置两列 18 个喷头,距离地面高度 2 m,相邻喷头间距为 2 m(图 1)。为了防止风对降雨均匀度的影响,选择在无风或微风天气下进行试验。

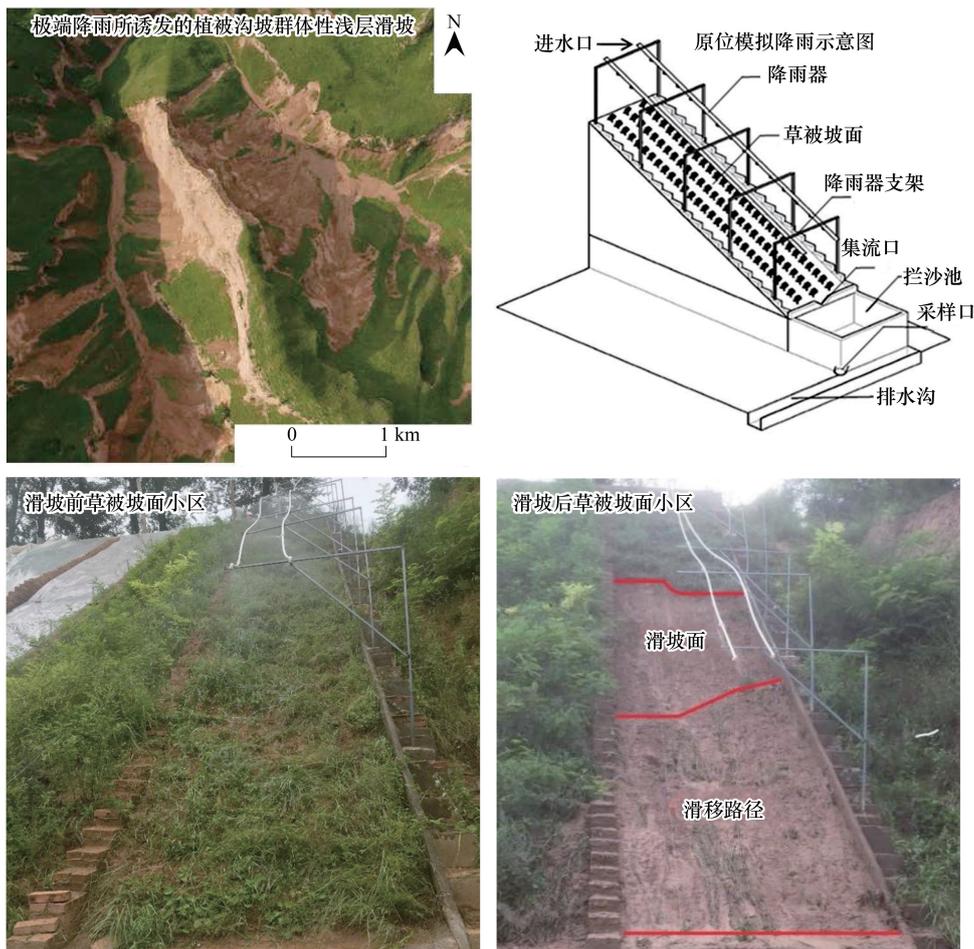


图 1 研究区及试验模型图

Fig.1 Study area and test model diagram

### 1.3 试验过程与指标计算

每个小区试验前采用梅花桩法定点率定雨强,率定雨强与设计雨强 60 mm/h 误差在 5% 以内,且降雨均匀度达到 80% 以上。为了研究径流泥沙在滑坡前后的差异,每个试验小区降雨 2—3 场,一直到发生浅层滑坡,且在出现滑坡后再进行 1 场降雨,具体降雨试验组次见表 3。每场降雨产流后每 5 min 在采样口使用 1 L 采样瓶接取径流泥沙样,并记录采样时间。用烘干法测定所接泥沙样的泥沙质量,结合取样体积就可得出每个样品中的含沙量。试验过程中,用摄影装置记录试验小区状况,以观测滑坡发生的过程。

降雨前,在径流小区上、中、下部采集 10 cm、30 cm 和 50 cm 土层深度处的少量土壤样品,测定土壤含水量。滑坡发生后,待该场降雨结束,取滑坡体、滑坡面下层土壤和滑坡后壁上方土壤相应深度的土壤样品,测

定土壤含水量。待降雨实验结束 12 h 后,对滑坡的长度、宽度、深度以及滑坡位置进行测量和记录,通过平行断面法把滑坡区划分为锥形体、截锥体、梯形体等多个较为规则的几何模型,依据对应的模型测量并计算各段体积,通过累加来计算滑坡体的体积。

表 3 黄土高原草被沟坡浅层滑坡试验组次

Table 3 Test groups of shallow landslides in grass slope on the Loess Plateau

| 试验小区<br>Test plots | 降雨强度<br>Rainfall intensity/<br>(mm/h) | 次降雨时间<br>Rainfall time/min | 降雨场次<br>Number of rains | 总降雨历时<br>Total rainfall<br>time/h | 总降雨量<br>Total rainfall/mm |
|--------------------|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| I                  | 60                                    | 90                         | 3                       | 4.5                               | 270                       |
| II                 | 60                                    | 90                         | 2                       | 3.0                               | 180                       |
| III                | 60                                    | 90                         | 3                       | 4.5                               | 270                       |

基于径流小区的滑坡深度,在滑坡后壁处用 100 cm<sup>3</sup> 环刀取 0—20、20—40、40—60 cm 土层的土壤样品,每层 3 个重复。通过环刀体积,采用烘干法测定土壤样品的土壤容重;采用浸水法测定总孔隙度和饱和含水量;采用双环刀法固定水头高度,测定土壤样品的饱和导水率。

采用环刀法测定土壤样品的土壤容重、孔隙度和饱和含水量,采用双环刀法测定土壤样品的饱和导水率。各指标计算公式如下:

$$\text{径流率: } R = \frac{60 \times \left( V_r - \frac{M_r}{2.65 \times 1000} \right)}{T \times A \times \cos\theta} \quad (1)$$

式中, $R$  为接样时段内径流率,mm/min; $V_r$  为接取径流泥沙样的体积,L; $M_r$  为径流泥沙样中烘干土质量,g; $T$  为接样时间,s; $\theta$  为小区坡度,°; $A$  为小区面积,m<sup>2</sup>。

$$\text{径流含沙量: } W = \frac{M_r}{V_r} \quad (2)$$

式中, $W$  为接样时段内含沙量,kg/m<sup>3</sup>。

$$\text{产沙率: } E = \frac{60 \times M_r}{T \times A \times \cos\theta} \quad (3)$$

式中, $E$  为接样时段内单位面积上的产沙率,g m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>。

#### 1.4 数据处理与分析

采用单因素方差分析,对滑坡后壁处土壤剖面的土壤物理性质进行差异性分析。采用独立样本  $T$  检验,对草被坡面浅层滑坡发生前后径流率、含沙量和产沙率进行差异性分析。将根重密度与土壤容重、孔隙度和饱和导水率进行 Pearson 相关性分析。相关统计分析均在 SPSS 19.0 软件中运行。

## 2 结果与分析

### 2.1 典型草被沟坡浅层滑坡形态特征

本试验模拟降雨所诱发的浅层滑坡,滑坡体在 1—2 秒内即从滑坡位置滑移至拦沙池中。小区 I、II 和 III 分别在总降雨历时 183、72、128 min 后发生滑坡,至滑坡时的累计降雨量分别为 183、72、128 mm。如表 4 所示,三个小区的滑坡长度十分接近,其滑坡的平均长度为 4.2—6.1 m,最长达到 6.5 m。三个小区的平均滑坡深度均低于 50 cm,其范围在 14—36 cm 之间;与小区 I 和小区 III 低于 20 cm 的滑坡深度相比,小区 III 的滑坡深度较深,为 36 cm。由于滑坡的长度与宽度较为接近,滑坡体体积的大小主要取决于滑坡深度,三个小区的滑坡体积在 1.82—3.28 m<sup>3</sup> 之间。滑坡发生位置在小区坡面上随机分布,在坡面上、中、下部均有涉及,其中小区 I、II 的滑坡发生位置在小区中部以下,小区 III 的滑坡发生位置则在小区中部以上。

表 4 试验小区浅层滑坡形态参数特征及其发生位置

Table 4 Morphological parameter characteristics and occurrence location of shallow landslide in test plots

| 试验小区<br>Test plots | 滑坡长度<br>Landslide length/m |               | 滑坡深度<br>Landslide depth/cm |               | 滑坡宽度<br>Landslide width/m | 滑坡体体积<br>Landslide volume/m <sup>3</sup> | 滑坡位置<br>Landslide location |
|--------------------|----------------------------|---------------|----------------------------|---------------|---------------------------|--|----------------------------|
|                    | 最长<br>Longest              | 平均<br>Average | 最深<br>Deepest              | 平均<br>Average |                           |  |                            |
|                    | I                          | 6.5           | 6.1                        | 21            |                           |  |                            |
| II                 | 5.0                        | 4.2           | 51                         | 36            | 2.5                       | 3.28                                     | 下部                         |
| III                | 5.5                        | 5.4           | 21                         | 17            | 2.5                       | 2.01                                     | 中上部                        |

2.2 滑坡区域土壤物理性质特征

2.2.1 土壤物理性质随土层深度的变化

如图 2 所示,滑坡后壁土壤容重随土层深度的增大而增大,但容重在各相邻土层之间的增大幅度差异明显。三个小区的土壤容重在 0—20 cm 与 20—40 cm 土层间的增大幅度为 9.4%—25.2%,而其容重在 20—40 cm 与 40—60 cm 土层间的增大幅度为 1.2%—16.1%,前者明显大于后者。

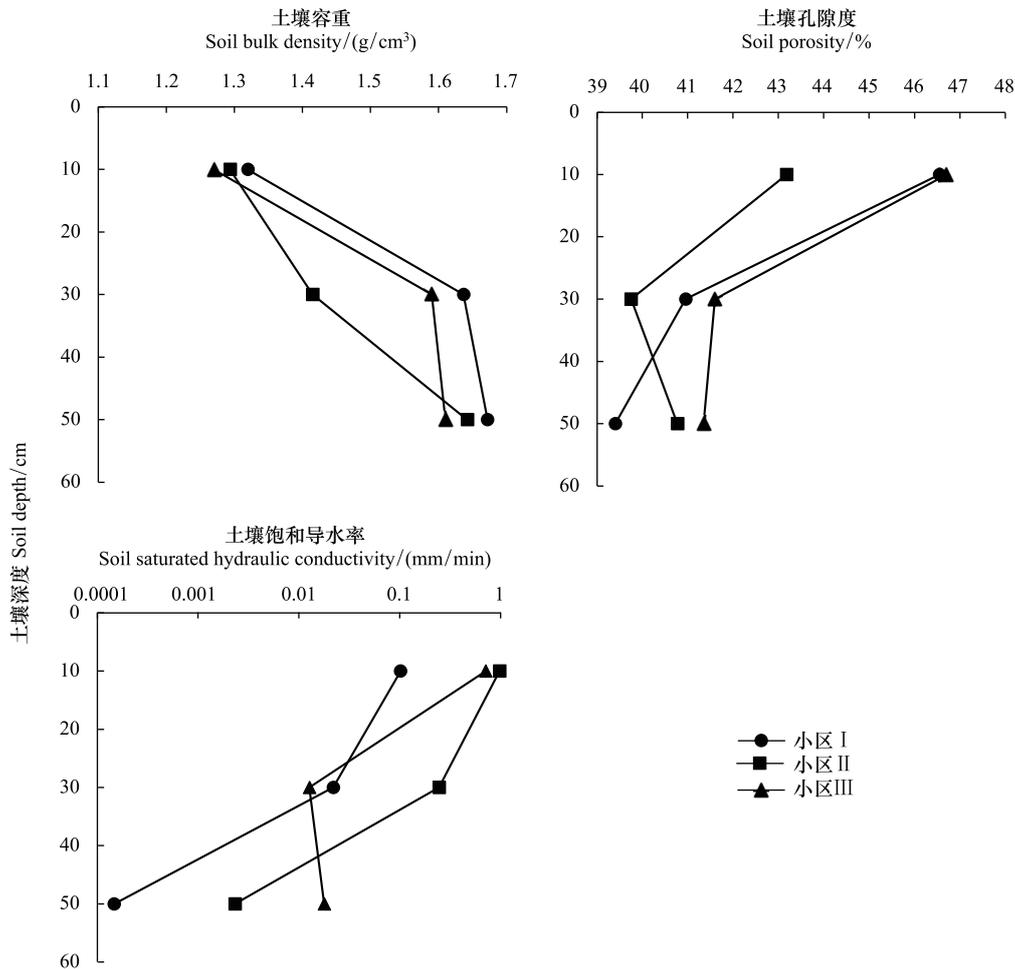


图 2 典型草被坡面土壤容重、孔隙度与饱和导水率随土层深度的变化

Fig.2 Variation of soil bulk density, porosity and saturated hydraulic conductivity of typical grass cover slope with soil depth

土壤孔隙度的变化与容重相反,整体上土壤孔隙度随土层深度的增大而减小,各相邻土层之间的变化幅度差异明显(图 2)。土壤孔隙度在 0—20 cm 与 20—40 cm 土层间的绝对差值为 3.4%—5.6%,而在土层深度 20—40 cm 与 40—60 cm 土层间的绝对差值为 0.3%—1.5%,前者大于后者。

土壤饱和导水率整体来说随土层深度的增大而减小,土壤饱和导水率在相邻土层之间的差异巨大(图2)。土壤饱和导水率在0—20 cm与20—40 cm土层间的减小幅度为74.7%—98.2%,而在20—40 cm与40—60 cm土层间的变化幅度最小为28.7%,最大为99.3%。

### 2.2.2 滑坡面上、下层土壤物理性质特征差异

草被根系与土壤物理性质关系密切,致使滑坡面上、下层土壤物理性质具有显著性差异。如表5所示,根重密度与土壤容重显著负相关( $P < 0.05$ ),与土壤孔隙度显著正相关( $P < 0.05$ );土壤容重与饱和导水率极显著负相关( $P < 0.01$ )。滑坡面上、下层土壤性质如表6所示,上层的土壤容重为1.27—1.36 g/cm<sup>3</sup>,下层的土壤容重为1.60—1.66 g/cm<sup>3</sup>,增大幅度为20.6%—26.0%。滑坡面下层的土壤饱和导水率为0.002—0.015 mm/min,滑坡面上层的土壤饱和导水率为0.102—0.612 mm/min,增大幅度高达8.2—311倍。滑坡面上层的土壤孔隙度(41.5%—46.7%)也大于滑坡面下层的土壤孔隙度(40.2%—41.5%)。

表5 试验小区植被根系与土壤物理性质相关关系

Table 5 Correlation between vegetation root and soil physical properties in test plots

|                          | 土壤容重              |          | 土壤孔隙度         |          | 饱和导水率                                 |          |
|--------------------------|-------------------|----------|---------------|----------|---------------------------------------|----------|
|                          | Soil bulk density |          | Soil porosity |          | Soil saturated hydraulic conductivity |          |
|                          | <i>P</i>          | <i>r</i> | <i>P</i>      | <i>r</i> | <i>P</i>                              | <i>r</i> |
| 根重密度 Root weight density | 0.021             | 0.747 *  | 0.018         | 0.757 *  | 0.082                                 | 0.608    |
| 土壤容重 Soil bulk density   | —                 | —        | 0.013         | 0.780 *  | 0.009                                 | 0.803 ** |

\* 表示在 0.05 水平上存在显著关系, \*\* 表示在 0.01 水平上存在显著关系

表6 试验小区不同土层物理性质指标

Table 6 Plasticity indices of different soil layers in test plots

| 试验小区<br>Test plots | 土层深度<br>Soil depth/cm | 土壤物理性质指标 Soil physical index                       |                          |  | 滑坡平均深度<br>Landslide depth/cm |
|--------------------|-----------------------|--|--------------------------|--|------------------------------|
|                    |                       | 土壤容重<br>Soil bulk density/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 土壤孔隙度<br>Soil porosity/% | 土壤饱和导水率<br>Soil saturated hydraulic<br>conductivity/(mm/min) |                              |
| I                  | 0—20                  | 1.32b  | 46.6a                    | 0.102a   | 14                           |
|                    | 20—40                 | 1.64a  | 40.9b                    | 0.022b   |                              |
|                    | 40—60                 | 1.67a  | 39.4b                    | 0.0001b  |                              |
| II                 | 0—20                  | 1.29c  | 43.2a                    | 0.977a   | 36                           |
|                    | 20—40                 | 1.42b  | 39.8b                    | 0.247b   |                              |
|                    | 40—60                 | 1.64a  | 40.8b                    | 0.002b   |                              |
| III                | 0—20                  | 1.27b  | 46.7a                    | 0.710a   | 17                           |
|                    | 20—40                 | 1.59a  | 41.6b                    | 0.012b   |                              |
|                    | 40—60                 | 1.61a  | 41.4b                    | 0.017b   |                              |

同一小区同一列不同字母表示显著性差异( $P < 0.05, n = 3$ )

由于滑坡面上、下层土壤性质的差异,入渗的水分在上、下层土壤的分布极不均匀。如表7所示,浅层滑坡发生时,滑坡面上层土壤水分已接近饱和,三个小区的上层土壤含水量达到32.5%—36.7%,土壤水分饱和度均超过90%,其范围为91.5%—98.2%。与降雨前上层土壤11.3%—18.9%的含水量相比,含水量的增大值为15.4%—21.2%。滑坡面下层土壤含水量则由降雨前的9.9%—14.1%上升至23.6%—25.7%,绝对差值为3.2%—7.2%。滑坡面上层土壤含水量的增大值远大于下层含水量,可见在短时的极端降雨下,入渗的水分更多地分布于上层土壤。以滑坡面上下层土壤含水量变化的绝对值为依据,入渗的水分在滑坡面上层土壤的分布比例均超过70%,其占比为74.4%—85.4%。尤其是径流小区II,其优势植物(冰草)有别于其它两个小区(铁杆蒿),其根系分布相对较深且均匀,水分得以更多地分布于滑坡面上层土壤(85.4%),是该小区在较少入渗量下即发生浅层滑坡的重要原因。

表 7 滑坡面上下层土壤水分变化特征

Table 7 Variation characteristics of soil moisture in the upper and lower layers of landslide surface

| 试验小区<br>Test plots | 滑坡面上层土壤质量含水量<br>Mass water content of<br>upper soil on landslide surface/% |                                 |   |                                    | 滑坡面下层质量含水量<br>Mass water content of<br>lower soil on landslide surface/% |                                 |   |                                    | $\frac{(Q_1 - Q_0) \times 100}{Q_1 - Q_0 + S_1 - S_0}$ |
|--------------------|--|---------------------------------|---|------------------------------------|--|---------------------------------|---|------------------------------------|--|
|                    | 降雨前<br>Before rain<br>$Q_0$  | 滑坡后<br>After landslide<br>$Q_1$ | 饱和含水量<br>Saturated water<br>content $Q$ | 饱和度<br>Water Saturation<br>$Q_1/Q$ | 降雨前<br>Before rain<br>$S_0$  | 滑坡后<br>After landslide<br>$S_1$ | 饱和含水量<br>Saturated water<br>content $S$ | 饱和度<br>Water Saturation<br>$S_1/S$ |  |
|                    | I  | 11.3                            | 32.5                                    | 35.5                               | 91.5   | 11.0                            | 18.2                                    | 23.6                               |  |
| II                 | 14.2   | 32.9                            | 33.5                                    | 98.2                               | 9.9  | 13.1                            | 24.8                                    | 52.8                               | 85.4   |
| III                | 18.9   | 34.3                            | 36.7                                    | 93.5                               | 14.1   | 19.4                            | 25.7                                    | 75.5                               | 74.4   |

2.3 浅层滑坡影响下的产流过程

三个小区的径流率在次降雨过程中均呈上升趋势(图3)。以小区 II 为例,第 1 场降雨,在滑坡前径流率由 0.06 mm/min(15 min)缓慢上升至 0.19 mm/min(70 min);在滑坡时则急剧上升至 0.68 mm/min(72 min),上升幅度为 254.2%;在滑坡后由 0.65 mm/min(75 min)缓慢上升至 0.70 mm/min(90 min)。

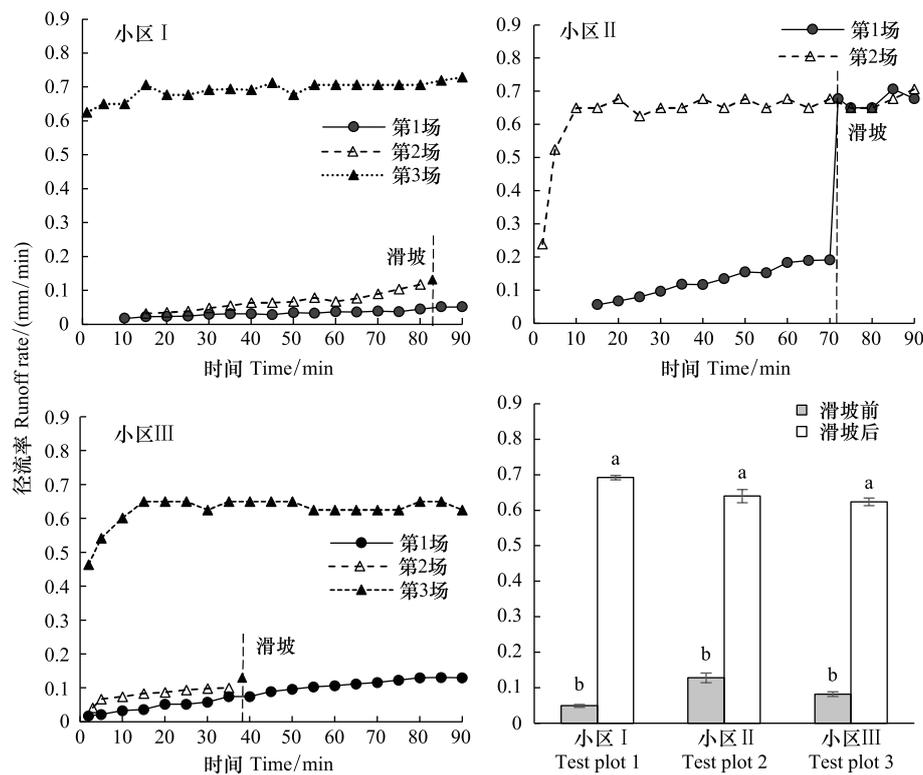


图 3 浅层滑坡对径流的影响

Fig.3 Change of Runoff rate with rainfall time

小区 I 在第 2 场降雨 83 min 时发生浅层滑坡;小区 II 在第 1 场降雨 72 min 时发生浅层滑坡;小区 III 在第 2 场降雨 38 min 时发生浅层滑坡;由于小区 I 和小区 III 在发生浅层滑坡时,泥沙堵塞了采样口,因此缺少部分数据;不同字母表示显著性差异( $P < 0.05$ ),滑坡前小区 I、II 和 III,  $n$  分别为 31, 12 和 27;滑坡后小区 I、II 和 III,  $n$  分别为 19, 23 和 19

与滑坡前各小区的径流率相比,三个小区的径流率在滑坡后均显著增大。如图 3 所示,滑坡前各小区的平均径流率仅为 0.05—0.13 mm/min,而滑坡后小区的平均径流率高达 0.62—0.69 mm/min,增大倍数为 4.0—13.1 倍。径流率的变异系数在滑坡前后的变化与径流率相反,滑坡前径流率的变异系数为 37%—50%,属高度变异,而滑坡后径流率的变异系数下降为 4%—14%,属小变异。

## 2.4 浅层滑坡影响下的侵蚀产沙过程

三个草被小区的产沙率在滑坡前的次降雨过程(第1场降雨)中呈缓慢上升趋势,在滑坡后的次降雨过程中(最后1场降雨)呈先增加后下降的趋势(图4)。浅层滑坡发生前,三个草被小区第1场降雨自产流开始至降雨结束,分别由0.01、0.25和0.01  $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ 上升至0.31、1.77和0.55  $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ 。浅层滑坡发生后,以小区III第3场降雨为例,其产沙率从产流开始时的16.0  $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ 上升至降雨15 min时的28.8  $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ ,而后波动下降至降雨结束时的12.5  $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ 。产沙率在滑坡时急剧上升,出现最大峰值。小区II的第1场降雨,滑坡发生时产沙率从1.77  $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ (70 min)升至406.5  $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ (72 min),增长倍数达到228倍。

滑坡前小区I和小区III的产沙率变异系数分别为61%和71%,滑坡后分别降低至15%和26%;小区II的产沙率变异系数在滑坡前后分别为69%和107%,结果有别于其它两个小区,但其第2场产沙率的变异系数为47%,低于滑坡前。可见,滑坡后产沙率的波动性主要体现在滑坡后20分钟内,而后随着降雨的持续产沙率趋于稳定,波动性逐渐低于滑坡前。

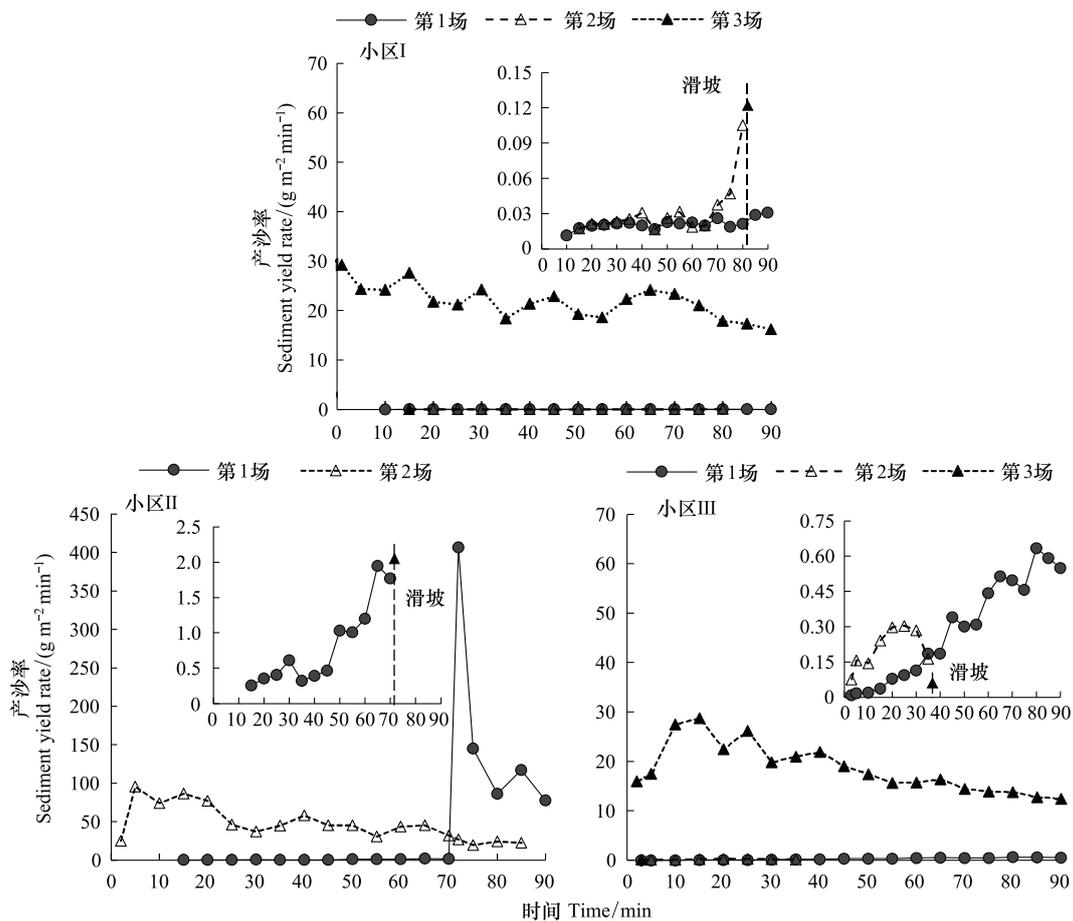


图4 产沙率随降雨时间的变化

Fig.4 Changes of sediment yield rate with rainfall time

与滑坡前各小区的含沙量和产沙率相比,三个小区的含沙量与产沙率在滑坡后均显著增大。如图5所示,滑坡前泥沙样品含沙量的平均值仅0.6—5.8  $\text{kg/m}^3$ ,滑坡后泥沙样品含沙量的平均值高达30.0—111.5  $\text{kg/m}^3$ ,增大倍数为9.9—54.9倍。滑坡前各小区的平均产沙率仅0.03—0.26  $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ ,滑坡后各小区的平均产沙率高达18.6—21.9  $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ ,增大倍数为70—841倍。可见,产沙率在浅层滑坡发生前后的增大幅度大于含沙量。

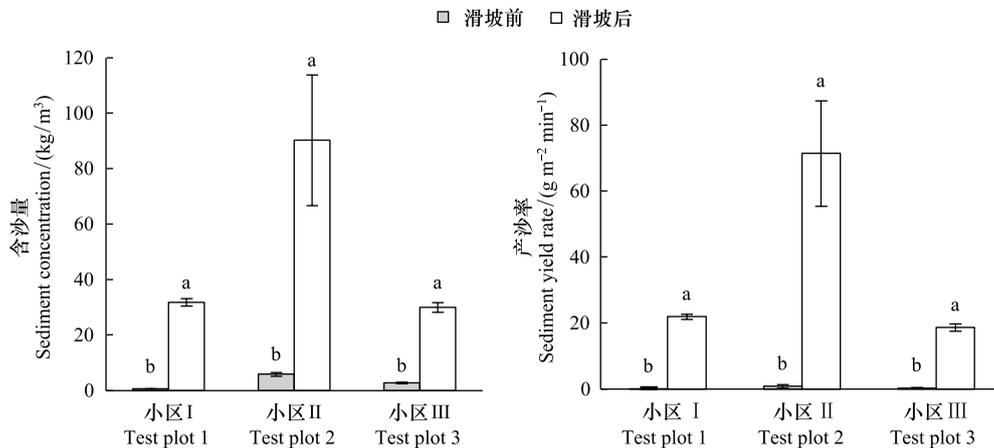


图 5 含沙量和产沙率在滑坡前后的变化

Fig.5 Changes of sediment concentration and sediment yield rate before and after landslide

### 3 讨论

#### 3.1 极端降雨下典型草被沟坡浅层滑坡的破坏机理

试验发现草被沟坡上极端降雨所诱发的浅层滑坡,其深度多低于 50 cm。如韩勇等<sup>[21]</sup>在子午岭林区浅层滑坡调查中,发现草被沟坡上的滑坡深度为 29—65 cm,其滑坡深度平均值为 45 cm。郭文召等<sup>[3]</sup>在黄土塬区南小河流域滑坡调查中,发现 63%滑坡深度在 20—50 cm 之间,都为小规模浅层滑坡。可见在滑坡深度上,在草被沟坡上模拟降雨所诱发的浅层滑坡与自然草被滑坡并无明显差异。

滑坡面上、下层土壤物理性质之间具有显著性差异,这说明在滑坡面附近存在一个土壤物理性质的转折点。对于植被根系与滑坡区土壤物理性质的相关性研究,与韩勇等<sup>[21]</sup>所发现的滑坡深度与根系重量、土壤容重和土壤孔隙度密切相关的研究结果相一致。植被根系使根土层和下层土壤的性质产生显著差异,上下土层间性质的差异,致使滑坡破坏易在根土层和下层土壤的界面发生。具体分析,即在极端降雨作用下,由于滑坡面上层土壤的饱和导水率(0.102—0.612 mm/min)远大于下层土壤(0.002—0.015 mm/min),随着上层土壤含水量增加,达到局部土壤饱和(饱和度超过 90%),土壤强度随之减弱并低于下滑力时,发生滑坡。Collins 和 Znidarcic<sup>[22]</sup>认为降雨诱发滑坡的重要原因,在于表层土壤入渗速率较高,导致正孔隙水压力的发展,土体较易达到饱和状态,破坏将由坡面内的渗透力引起。在试验过程中,滑坡发生后在滑坡后壁下部所发生的壤中流现象,也能间接证明以上说法。植物根系对土体的锚固与牵拉作用,使上层土壤与根系形成关系紧密的复合体,但是对于草被沟坡,由于根系较浅,并密布在土壤表层,形成深度较一致的根土复合体,在降雨诱发下可能发生较大规模的“揭皮式”滑坡。此外,黄恒伟<sup>[23]</sup>在浅层滑坡野外调查中发现植被的高密度生长也在较大程度上促进滑坡的产生。

#### 3.2 典型草被沟坡浅层滑坡对径流的影响

浅层滑坡发生前,草被减流效益十分明显。研究表明,草被根系可以增加土壤中的非毛管孔隙,促进降雨就地入渗<sup>[24]</sup>;另外植被可增加坡面粗糙度,增大坡面径流所受到的阻力,降低径流流速<sup>[25]</sup>。因此,滑坡发生前的径流率相对较小。

滑坡发生后,植被破坏,土壤裸露,原植物坡面地形出现两处变化:一是滑坡体下滑后裸露的滑坡面;二是下滑过程中,部分滑坡体覆盖了滑移路径的植被。在滑坡面区域,滑坡面下土层饱和导水率极低,阻碍雨水入渗;并且滑坡面位置大都在小区的中下部,坡面中下部为径流重要的汇水区域,该区域促使径流率显著上升。而部分滑坡体覆盖了滑移路径的植被,使植被无法发挥减小径流的功能(图 1);这也同样促使了径流率的升

高。径流率升高的另一个重要原因,是滑坡后壁下部壤中流的涌出。经对降雨停止 20 min 后的壤中流测定,发现壤中流强度仍达到 0.02—0.04 mm/min。可见滑坡发生后,壤中流对径流率升高起到较大作用。

### 3.3 典型草被沟坡浅层滑坡对侵蚀产沙的影响

草被具有显著的减沙效益。研究表明,草被能够增加土壤中的水稳性团粒以及有机质含量,并通过其根系复杂的网状结构提高土壤的抗冲性和抗蚀性<sup>[26—27]</sup>。并且草被能有效降低降雨动能<sup>[28]</sup>,减轻击溅侵蚀;能拦截径流,减缓径流流速,减弱径流对坡面的侵蚀力<sup>[29—30]</sup>。因此,滑坡前草被沟坡的产沙率总体很小。

浅层滑坡发生后,导致产沙率上升的原因主要有两点:(1)裸露的滑坡面和滑移路径区域,成为了重要的侵蚀产沙区域;(2)径流率的上升,提高了径流的挟沙能力。有研究发现,坡面下部植被在拦沙效益上起着重要作用<sup>[31—32]</sup>。而浅层滑坡发生后,部分滑坡体覆盖了滑移路径的植被,破坏了小区下部草被的拦沙效益。并且,滑坡面和滑移路径区域的土壤抗蚀性极低,又分布在小区下部这一重要汇水区域,汇集于此的径流能够携带大量泥沙,使浅层滑坡发生后的产沙率骤然上升。而后,随着植被破坏区域易被冲刷的土壤的流失,以及滑移路径区植被拦沙效益的恢复,产沙率逐渐降低。

侵蚀产沙受到滑坡规模的影响。滑坡规模越大,对应小区的产沙率越大。小区 II 的滑坡体积要大于其它两个小区,这是其浅层滑坡发生后的产沙率要高于其它两个小区的重要原因。郭文召<sup>[16]</sup>通过黄土高原六道沟小流域野外模拟降雨实验,也发现滑坡体越大,导致的含沙量和产沙率越大。滑坡发生位置也可能影响侵蚀产沙。小区 II 的浅层滑坡发生位置在小区下部,其它两个小区的发生位置在小区中部附近。研究发现,小区下部的水流路径长度要大于上部<sup>[33]</sup>,而水流路径长度越长,径流速度越快,汇聚的径流越多,泥沙输移能力越强<sup>[34]</sup>。这也可能导致小区 II 的产沙率要高于其它两个小区。

## 4 结论

通过野外模拟降雨试验,在一定降雨强度(60 mm/h)的条件下探究极端降雨所诱发的浅层滑坡对黄土高原典型草被沟坡径流泥沙的影响,主要得到以下结论:

(1)模拟极端降雨所诱发的草被沟坡上的浅层滑坡深度为 14—36 cm,与自然强降雨所导致浅层滑坡深度相贴合,均是低于 50 cm。

(2)植被根系与土壤容重、孔隙度等土壤性质显著相关( $P < 0.5$ ),致使滑坡面上、下层土壤物理性质差异显著( $P < 0.5$ )。土壤容重随土层深度的增大而增大,滑坡面下层土壤容重相对于滑坡面上层增大 20.6%—26.0%;土壤饱和导水率总体随土层深度的增大而减小,滑坡面上层土壤饱和导水率相对于滑坡面下层增大 8.2—311 倍;土壤孔隙度总体随土层深度的增大而减小,滑坡面上层的土壤孔隙度(41.5%—46.7%)大于滑坡面下层的土壤孔隙度(40.2%—41.5%)。由于以上土壤性质的差异,在极端降雨下,滑坡面上层土壤水分更快达到饱和,土壤水分饱和度超过 90%,是诱发滑坡的重要原因。

(3)草被沟坡上浅层滑坡发生后的径流与产沙均显著增大。三个小区的平均径流率在滑坡前仅 0.05—0.13 mm/min,在滑坡后高达 0.62—0.69 mm/min,增大倍数为 4.0—13.1 倍;其径流平均含沙量和平均产沙率在滑坡前分别为 0.6—5.8 kg/m<sup>3</sup> 和 0.03—0.26 g m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>,在滑坡后分别升至 30.0—111.5 kg/m<sup>3</sup> 和 18.6—21.9 g m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>,增大倍数分别为 9.9—54.9 倍和 70—841 倍。

### 参考文献(References):

- [ 1 ] 胡春宏, 张晓明. 关于黄土高原水土流失治理格局调整的建议. 中国水利, 2019(23): 5-7, 11.
- [ 2 ] 胡春宏, 张晓明. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化. 水利水电技术, 2020, 51(1): 1-11.
- [ 3 ] Guo W Z, Chen Z X, Wang W L, Gao W W, Guo M M, Kang H L, Li P F, Wang W X, Zhao M. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau. Geomorphology, 2020, 350: 106879.
- [ 4 ] 曹斌挺, 焦菊英, 王志杰, 魏艳红, 李玉进. 2013 年延河流域特大暴雨下的滑坡特征. 水土保持研究, 2015, 22(6): 103-109.
- [ 5 ] De Rose R C. Slope control on the frequency distribution of shallow landslides and associated soil properties, North Island, New Zealand. Earth

- Surface Processes and Landforms, 2013, 38(4): 356-371.
- [ 6 ] Huang R Q. Some catastrophic landslides since the twentieth century in the southwest of China. *Landslides*, 2009, 6(1): 69-81.
- [ 7 ] Li C J, Ma T H, Zhu X S, Li W. The power-law relationship between landslide occurrence and rainfall level. *Geomorphology*, 2011, 130(3/4): 221-229.
- [ 8 ] Wang G L, Li T L, Xing X L, Zou Y. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(12): 7933-7944.
- [ 9 ] 焦菊英, 王志杰, 魏艳红, 苏娜, 曹斌挺, 李玉进. 延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 159-167.
- [ 10 ] 魏丽, 单九生, 朱星球. 植被覆盖对暴雨型滑坡影响的初步分析. *气象与减灾研究*, 2006, 29(1): 29-33.
- [ 11 ] 赵兴阳, 徐向舟, 蒋云钟, 高航, 张红武. 暴雨条件下植被对黄土沟坡重力侵蚀的影响. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 58-63.
- [ 12 ] Nyssen J, Poesen J, Veyret-Picot M, Moeyersons J, Haile M, Deckers J, Dewit J, Naudts J, Teka K, Govers G. Assessment of gully erosion rates through interviews and measurements: a case study from northern Ethiopia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(2): 167-185.
- [ 13 ] Navarro-Hevia J, Lima-Farias T R, de Araújo J C, Osorio-Peláez C, Pando V. Soil erosion in steep road cut slopes in Palencia (Spain). *Land Degradation & Development*, 2016, 27(2): 190-199.
- [ 14 ] 周琪龙. 黄土沟壑区土壤侵蚀与浅层滑坡相关关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [ 15 ] 赵超, 王书芳, 徐向舟, 董占地. 重力侵蚀黄土沟壑区沟坡产沙特性. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 140-145.
- [ 16 ] 郭文召. 黄土沟坡重力侵蚀与产沙过程试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [ 17 ] 陈卓鑫. 黄土高塬沟壑区植被恢复坡面浅层滑坡特征及其影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [ 18 ] 黄玉华, 武文英, 冯卫, 李政国. 陕北延安“7.3暴雨”诱发地质灾害主要类型与特征. *西北地质*, 2014, 47(3): 140-146.
- [ 19 ] 郭富赞, 孟兴民, 黎志恒, 谢正团, 陈冠, 何云峰. 天水市“7·25”群发性地质灾害特征及成因. *山地学报*, 2015, 33(1): 100-107.
- [ 20 ] Yang B, Wang W L, Guo M M, Guo W Z, Wang W X, Kang H L, Zhao M, Chen Z X. Soil erosion of unpaved loess roads subjected to an extreme rainstorm event: a case study of the Jiuyuangou watershed on the Loess Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(6): 1396-1407.
- [ 21 ] 韩勇, 郑粉莉, 徐锡蒙, 盛贺伟. 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. *生态学报*, 2016, 36(15): 4635-4643.
- [ 22 ] Collins B D, Znidarcic D. Stability analyses of rainfall induced landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(4): 362-372.
- [ 23 ] 黄恒伟. 云南昌宁“9.16”群发性浅层滑坡与植被关系研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [ 24 ] Hu W, Shao M G, Wang Q J, Fan J, Horton R. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 355-366.
- [ 25 ] 张思毅, 梁志权, 谢真越, 卓慕宁, 廖义善, 郭太龙, 李定强. 植被调控红壤坡面土壤侵蚀机理. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 1-5, 18.
- [ 26 ] Novara A, Gristina L, Saladino S S, Santoro A, Cerdà A. Soil erosion assessment on tillage and alternative soil managements in a Sicilian vineyard. *Soil and Tillage Research*, 2011, 117: 140-147.
- [ 27 ] 张琪琳, 王占礼, 王栋栋, 刘俊娥. 黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展. *地球科学进展*, 2017, 32(10): 1093-1101.
- [ 28 ] 朱燕琴, 赵志斌, 齐广平, 康燕霞, 赵霞. 陇中黄土高原丘陵沟壑区不同植被恢复模式下次降雨产流产沙特征. *干旱区地理*, 2020, 43(4): 920-927.
- [ 29 ] 蔡泽康, 王薇, 尚海鑫, 张宽地. 草被覆盖度下坡面流流速变化及缓流机制研究. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(3): 225-231, 240.
- [ 30 ] 史倩华, 李焱林, 王文龙, 刘瑞顺, 郭明明, 欧阳潮波. 不同植被措施对露天煤矿排土场边坡径流产沙影响. *草地学报*, 2016, 24(6): 1263-1271.
- [ 31 ] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(9): 1161-1169.
- [ 32 ] 赵炯昌, 潘岱立, 卫伟, 段兴武. 植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究. *生态学报*, 2021, 41(4): 1373-1380.
- [ 33 ] 闫帅旗, 朱冰冰, 边焯. 不同覆盖位置下草地坡面水流路径长度变化特征. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 116-123.
- [ 34 ] Mayor Á G, Bautista S, Small E E, Dixon M, Bellot J. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: a tool for assessing potential water and soil losses in drylands. *Water Resources Research*, 2008, 44(10): W10423.