

DOI: 10.5846/stxb201501140117

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): - .  
Han Y, Zheng F L, Xu X M, Sheng H W. Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziwuling forest area: A case study of the “7·21” disaster in Fuxian County. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

## 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

韩 勇<sup>1,3</sup>, 郑粉莉<sup>1,2,\*</sup>, 徐锡蒙<sup>2</sup>, 盛贺伟<sup>2</sup>

1 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学 水土保持研究所, 杨凌 712100

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**以 2013 年陕北富县“7·21”特大暴雨滑坡侵蚀灾害为对象,通过调查暴雨侵蚀区典型小流域植被条件及滑坡特征,测定滑坡壁不同土层的根系重量、土壤孔隙度、土壤容重等指标,研究子午岭林区暴雨滑坡侵蚀与植被根系的关系。根据不同类型植被根系深度和滑坡侵蚀特征(侵蚀深度、滑动面宽度及长度,滑坡体体积、滑动距离等),可将林区暴雨滑坡侵蚀划分为三类:以草本植被为主的 A 类滑坡,以灌丛植被为主的 B 类滑坡,以乔木植被为主的 C 类滑坡。结果表明,三类滑坡侵蚀的侵蚀深度与其对应植被类型的根系深度相近,且植被及其根系会加剧滑坡侵蚀的发生。在此次暴雨滑坡侵蚀中,滑坡侵蚀强度受植物根系重量、土壤孔隙度、土壤容重等因素的共同影响,但根系重量对滑坡侵蚀强度的影响占主导作用,通过建立二者之间的关系式发现,根系对滑坡侵蚀的贡献率超过 80%。不同植被类型的滑坡侵蚀深度不同,且滑坡侵蚀强度也存在差异,表明植被根系不仅具有塑造滑坡侵蚀特征的作用,而且会影响滑坡侵蚀的强弱程度。在强降水基础上,特别是当降水量达到诱发滑坡灾害发生的临界值时,植被及其根系会加剧滑坡侵蚀的发生。在今后工作中,要因地制宜合理配置各类植被,同时结合其它措施,以便提高植被防治水土流失的作用,更好地发挥植被的水土保持效益。

**关键词:**滑坡侵蚀;侵蚀强度;植被类型;根系;“7·21”特大暴雨

## Relationship between shallow landslide erosion and vegetation in the Ziwuling forest area: A case study of the “7·21” disaster in Fuxian County

HAN Yong<sup>1,3</sup>, ZHENG Fenli<sup>1,2,\*</sup>, XU Ximeng<sup>2</sup>, SHENG Hewei<sup>2</sup>

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

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** To clarify the relationship between surface landslide and vegetation, a case study of the ‘7·21’ rainstorm disaster in Fuxian County, northern Shaanxi Province, was conducted. A typical small watershed in the Ziwuling forest area was selected as the research site. The study investigated the vegetation conditions and landslide characteristics and simultaneously collected soil samples (root weight, soil bulk density, and saturated water content) from different soil layers of the landslide cliff. According to different vegetation conditions (i.e., vegetation type, dominant species, root depth) and shallow landslide characteristics (i.e., erosion depth, width and length of sliding surface, landslide volume, sliding distance), 37 surface landslides were grouped into three types (A, B, and C). The dominant vegetation of types A, B, and C were mainly herbage, shrub, and arbor, respectively. The scale of the landslides was in the order of type A < B < C.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(41271299)

**收稿日期:**2015-01-14; **网络出版日期:**2015-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

The average erosion depth was 45, 63, and 96 cm, and the landslide volume was about 100–500, 300–700, and 500–1500 m<sup>3</sup>, respectively, for types A, B, and C. Some landslide materials accumulated at the bottom of the slope of types B and C slides, and some landslide materials were even deposited at the gully bed of type C. The results showed that the different types of surface landslide presented unique landslide erosion depths and that these depths were normally equal to the root depth. Moreover, landslide erosion intensity increased with vegetation root weight. Surface landslide was aggravated by vegetation and its roots. We also found that shallow landslide intensity was affected mainly by three factors, root weight, soil porosity, and soil bulk density, and that the heavy rainstorm was the triggering factor in this surface landslide erosion. However, soil porosity and soil bulk density were both affected by root weight, and a linear regression analysis indicated that only root weight made a positive contribution to landslide erosion intensity. The contribution rate of root weight to the landslide erosion intensity exceeded 80%. The shallow landslides corresponding to different vegetation types had different erosion depths and intensities. This means that vegetation and its roots not only have significant effects on shaping the erosion features of shallow landslide but also can affect the degree of landslide erosion intensity. In cases of high precipitation, especially when the precipitation is up to or higher than the critical value, vegetation and its roots will aggravate the development of landslide erosion. In related future works pertaining to soil and water conservation, the soil and water conservation effects of vegetation should be addressed when forestry measures are applied. We can reasonably allocate different types of vegetation and simultaneously supplement with other engineering measures to improve the control of soil and water loss and optimize the benefits of soil and water conservation.

**Key Words:** landslide erosion; erosion intensity; vegetation type; roots; “7·21” rainstorm

降雨,特别是暴雨是诱发滑坡、崩塌等地质灾害的重要原因<sup>[1-2]</sup>。全国 290 个县市的地质调查结果表明,暴雨诱发的滑坡占滑坡总数的 90%以上<sup>[3]</sup>。2013 年 7 月 21 日 20 时至 22 日 10 时,位于子午岭林区的富县全境普降暴雨,平均降雨量 146.5 mm,其暴雨中心—张村驿镇降雨量达到 172.8 mm<sup>[4]</sup>。该次暴雨造成富县多处山体发生滑坡和崩塌等次生灾害,致使大量农田被掩埋,道路中断,房屋受损,给人民群众造成了严重的生命财产损失<sup>[5]</sup>。

子午岭林区是黄土高原目前惟一保存较完整的天然次生林区,具有完整的植被演替序列。由于该区森林郁闭度很高,地表覆盖度达 90%以上,土壤侵蚀已很轻微<sup>[6]</sup>。然而在此次暴雨过程中,该区植被覆盖良好的沟缘线附近滑坡侵蚀异常强烈,引发对土体稳定性与植被关系的重新思考。目前,国内外关于土体稳定性与植被关系的研究,大多趋向于认为植被及其根系对土体稳定性具有明显的促进作用<sup>[7-10]</sup>,因此,植被护坡在铁路、公路等生产建设项目边坡防护方面得到大量应用<sup>[11-13]</sup>。但仍有一部分研究者认为植被对土体稳定性的影响是复杂的、多方面的,特别是在降雨条件下,植被通过增加降水入渗量、增加土体重量,从而改变土体水文效应和力学效应,对斜坡土体稳定性产生不利影响<sup>[14-17]</sup>。魏丽等<sup>[18]</sup>也认为植被覆盖程度越高,发生滑坡灾害的危险性越大。结合此次暴雨滑坡侵蚀实际情况,笔者产生以下疑问:造成此次林区暴雨滑坡侵蚀林草地较无植被土体剧烈的主要原因是什么,其滑坡侵蚀的特征与植被类型有什么样的关系?这些问题的回答有助于确切评价植被的防蚀效果,进一步分析降雨—植被—土体稳定性之间的关系。为此,本文通过调查子午岭林区典型小流域暴雨滑坡侵蚀特征,分析影响林草地暴雨滑坡侵蚀剧烈的主要原因,探讨植被类型以及根系分布对暴雨滑坡的影响,进而加深理解林草植被与暴雨滑坡侵蚀的关系,为科学评价植被防蚀作用机理提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于子午岭林区陕西富县境内(35°44′06″N—36°23′23″N,108°29′30″E—109°42′54″E)。该区属典

型黄土丘陵沟壑地貌,由于地处新构造运动相对强烈抬升区,滑坡面出露频繁,但大多已被林草植被所固定<sup>[6]</sup>。地面组成物质主要以新、老黄土为主,有些沟谷底部有三趾马红土和白垩纪砂、页岩出露。土壤为尚处于发育阶段的灰褐色森林土,有明显腐殖质层,但无明显淋溶层与垫积层<sup>[19]</sup>。年均降水量为 576.7 mm,主要集中在 7—9 月。林区植被繁茂,地表覆盖度在 90% 以上,林下枯枝落叶层厚度达 5—8 cm。因植被条件良好,土壤侵蚀轻微,年侵蚀模数多在 100 t/(km<sup>2</sup>·a) 以下<sup>[20]</sup>。“7·21”特大暴雨后,通过对该区滑坡侵蚀灾害进行实地勘察,选取位于富县任家台林场的小流域为研究区域。研究区面积 0.7 km<sup>2</sup>,其中农耕地面积占总面积 65.7%。区内共有 37 个规模不等的滑坡,滑坡分布密度达 52.8 个/km<sup>2</sup>,远高于相近降雨条件下的非林区滑坡分布密度<sup>[21]</sup>。

## 1.2 “7·21”特大暴雨水文特征

根据子午岭野外试验站观测结果,本次特大暴雨历时 12 h,降雨 131 mm,最大 30 min 雨强为 0.53 mm/min。该次暴雨的降雨过程如图 1 所示,产流特征如表 1 所示。

## 1.3 研究方法

笔者于 2013 年 7 月 23 日调查了流域内所有滑坡的基本特征(滑动面深度、长度、宽度等)以及滑坡周边的植被特征(包括植被类型、主要物种、覆盖度、郁闭度等)。在此基础上,于 2013 年 7 月 24 日按照主要植被类型(草本、灌丛、乔木)及滑坡侵蚀深度,选取 9 处具有典型侵蚀特征的滑坡(三类滑坡侵蚀各选定有代表性的 3 处作为 3 次重复处理),并在其滑坡后壁部位进行土壤剖面和植被根系调查。

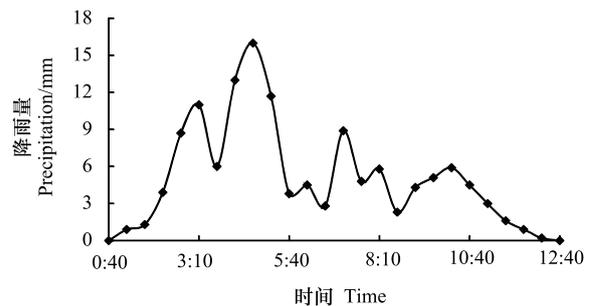


图 1 “7·21”特大暴雨降雨过程  
Fig.1 Processes of “7·21” rainstorm

表 1 “7·21”特大暴雨径流特征

Table 1 Runoff characteristics of “7·21” rainstorm

小区 Plot	坡面位置 Position	小区处理 Treatment	径流量 Runoff amount/m <sup>3</sup>	径流系数 Runoff coefficient
径流小区 Runoff plot	全坡面(坡顶到坡底) Whole slope (summit to bottom of slope)	裸露坡耕地 The bare land	188	0.42
对照小区 CK		林草地 Forest land	0	0

基于此次暴雨在研究区林地径流小区的最大入渗深度及滑坡产生的最大侵蚀深度,将土壤剖面调查深度确定在 150 cm,并以 10 cm 为一层将各剖面划分为 15 层。同时,确定土壤容重、饱和含水量、根系重量这 3 个指标为采样指标在剖面调查过程中进行采样。确定的 3 个取样指标在每个剖面(9 个)每层(15 层)均取 2 个样品(2 次重复),因此,试验过程中每个采样指标分别采集 270 个(9 个×15 层×2 次重复)土壤样品。整个试验过程共采集 810 个(3 个指标×270 个)土壤样品。各指标的测定方法如下:

- 1) 土壤容重 用环刀法测定各土层的土壤容重。
- 2) 土壤孔隙度 基于各土层的土壤容重,计算对应土层的土壤孔隙度。
- 3) 土壤含水量 用烘干法测定各土层土壤含水量(利用土壤容重样品进同时行测定)。
- 4) 饱和土壤含水量 各土层分别取原状土,用浸水法测定。
- 5) 根系重量 按根钻法每 10 cm 分层采集根系样品,样品带回实验室后过筛并拣出所有根系,用水冲洗出后晾干称重。

## 1.4 数据获取及处理

滑坡侵蚀强度:单位面积滑动面上产生的滑坡侵蚀量。由于滑坡为整层下滑,滑动面基本呈矩形,假定滑

坡侵蚀深度  $H$ , 滑动面长度为  $L$ , 滑动面宽度为  $b$ , 滑坡后壁土体厚度为  $h_i$  的第  $i$  层土壤容重为  $\rho_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 15$ ), 则滑坡侵蚀深度  $H$ 、滑坡侵蚀量  $A$ 、滑坡侵蚀强度  $M_s$  计算式分别为:

$$\text{滑坡侵蚀深度: } H = h_1 + h_2 + \dots + h_i \quad (1)$$

$$\text{滑坡侵蚀量: } A = \sum_{i=1}^{15} (L \times b \times h_i \times \rho_i) = 10(L \times b) \sum_{i=1}^{15} \rho_i \quad (2)$$

$$\text{滑坡侵蚀强度: } M_s = A/S = 10 \sum_{i=1}^{15} \rho_i \quad (3)$$

式中,  $A$  为滑坡侵蚀量,  $\text{kg}$ ;  $H$  为滑坡侵蚀深度,  $\text{cm}$ ;  $h_i$  为第  $i$  层深度,  $\text{cm}$ ;  $L$  为滑动面长度,  $\text{m}$ ;  $b$  为滑动面宽度,  $\text{m}$ ;  $\rho_i$  为土壤容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $M_s$  为滑坡侵蚀强度,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;  $S$  为滑动面面积,  $\text{m}^2$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被类型对滑坡侵蚀特征的影响

根据滑坡侵蚀的基本特征, 结合滑坡周围的植被类型, 将该流域 37 处滑坡大致划分为三类(表 2), 旨在进一步探讨植被类型对这次暴雨滑坡侵蚀特征的影响。以草本植被为主的 A 类滑坡, 共计 14 处, 规模较小, 体积多在 100—500  $\text{m}^3$  之间, 滑动距离较短, 滑坡物质多在沟坡下部发生堆积。以灌丛植被为主的 B 类滑坡, 共计 7 处, 滑坡规模较 A 类为大, 体积多在 300—700  $\text{m}^3$  之间, 滑动距离较远, 部分滑坡物质堆积于沟坡下部未能进入沟道。以乔木植被为主的 C 类滑坡, 共计 16 处, 其规模在三类滑坡中最大, 体积多在 500—1500  $\text{m}^3$  之间, 滑动距离较远, 滑坡物质大多进入沟道而堆积于沟床。

表 2 植被类型与滑坡侵蚀特征

Table 2 Vegetation and characteristics of three types of landslide erosion

类型 Type	植被类型 Vegetation type	主要物种 Main species	滑坡位置 Location	滑动面特征 Characteristics of sliding surface
A	草本为主, 灌丛、乔木较少	羽茅、白草、铁杆蒿、野菊、四季青等	主要位于小流域上部	宽度多在 14—30 m, 长度多在 15—30 m, 坡度多在 27°—35°
B	灌丛为主, 草本、乔木较少	黄刺梅、虎榛子、铁杆蒿、绣线菊、胡枝子等	主要位于小流域中上部	宽度多在 10—23 m; 长度多在 20—50 m; 坡度多在 30°—40°
C	乔木为主, 灌丛、草本次之	油松、山杨、白桦、辽东栎、杜梨等	主要位于小流域下部	宽度多在 8—20 m; 长度多在 30—70 m, 坡度多在 33°—47°

上述三类滑坡中, A 类滑坡的侵蚀深度为 29—65  $\text{cm}$ , 其滑坡侵蚀深度平均值为 45  $\text{cm}$ ; B 类滑坡数侵蚀深度范围在 58—73  $\text{cm}$ , 分布较集中, 其滑坡侵蚀深度平均值为 63  $\text{cm}$ ; C 类滑坡数量最多, 侵蚀深度范围为 75—141  $\text{cm}$ , 分布较前两种相对分散, 其滑坡侵蚀深度平均值为 96  $\text{cm}$ ; 若以 100  $\text{cm}$  为界对滑坡的侵蚀深度划分, 则滑坡深度小于 100  $\text{cm}$  的滑坡数目占总数的 69%(表 3), 其中以分布于 30—100  $\text{cm}$  的滑坡占绝大多数, 其数目占总滑坡总数的 92%, 说明此次暴雨滑坡的侵蚀深度具有相对集中的特性, 即滑坡土体为根系相对集中分布的浅层土体。

表 3 滑坡侵蚀深度分布统计

Table 3 Distribution of landslide erosion depth

深度范围 Depth/cm	<30	31—40	41—50	51—60	61—70	71—80	81—90	91—100	101—110	111—120	>121
滑坡个数 The number of landslide	1	4	6	4	5	3	6	3	2	1	2
分布频率 Frequency/%	3	11	16	11	14	8	16	8	5	3	5

### 2.2 滑坡侵蚀深度与根系分布特征的关系

由于不同植被类型对应不同的滑坡侵蚀深度及滑坡规模, 因此, 这里探讨植被根系分布特征与滑坡侵蚀

深度的关系。图 2 表明,以草本植被为主的 A 类滑坡,占总根量 60% 的根系分布在 0—40 cm 土层,而 40 cm 以下迅速减少;以灌丛植被为主的 B 类滑坡,占总根量的 70% 以上的根系分布于 0—60 cm 土层,60 cm 以下随土层深度增加根系逐渐减少;以乔木植被为主的 C 类滑坡根系分布则相对较深,占总根量 80% 左右的根系分布在 0—80 cm 土层,100 cm 以下均迅速减少。前人的研究结果也表明,以白草等草本植被为主的根系主要分布在 0—40 cm 土层,以铁杆蒿、绣线菊等为主的灌木半灌木植被的根系主要分布在 0—60 cm 土层;而油松、辽东栎等乔木植被的根系则主要分布在 0—80 cm 土层<sup>[22-24]</sup>。

虽然图 2 中三类滑坡侵蚀的植被根系重量在不同土层深度的变化趋势不同,但对于具有深厚土层的黄土而言,植被的根系仍相对集中的分布于浅层<sup>[25]</sup>,且三者根系总重量方面差异并不显著。这些根系在土体中穿插、缠绕、固结,从而极大的改变了根系层土壤的抗侵蚀能力<sup>[17]</sup>。为此,这里通过土壤剖面调查进一步分析了滑坡侵蚀深度与植被根系深度的关系。结果表明,滑坡侵蚀深度与植被根系深度具有很好的线性关系(图 3),说明此次暴雨滑坡侵蚀过程中,植物根系深度决定了滑坡侵蚀深度。

### 2.3 滑坡侵蚀强度与各指标相关关系分析

一般来说,植被可通过改变土壤水分情况来改变土壤的抗剪强度,从而起到固土护坡的作用。但降雨径流会导致土壤含水量增加,土体抗剪强度减小,使得边坡失稳变形。在一定环境条件下,随着含水量增加,植被提高土壤的抗剪强度的程度会逐渐减小<sup>[26-27]</sup>。为此,本研究根据土壤剖面调查结果,对滑坡侵蚀强度与对应深度处的根系重量、土壤孔隙度、土壤容重、土壤含水量、饱和土壤含水量进行偏相关分析,讨论滑坡侵蚀强度与这些影响因素的相关关系。

从表 4 可以看出,三类滑坡的侵蚀强度与根系重量相关性最好,相关系数均在 0.9 以上;其次为土壤孔隙度和土壤容重,相关系数均在 0.8 以上。而滑坡侵蚀强度与土壤含水量以及饱和土壤含水量相关性较差,相关系数基本均低于 0.6。有研究表明,土壤含水量对滑坡具有重要影响<sup>[26]</sup>,即二者之间具有较好的相关性。但表 4 中土壤含水量与滑坡侵蚀强度的相关性较差,究其原因可分为两方面。首先,以往研究中的滑坡侵蚀大多发生在在地震、人类活动等直接或间接影响后的无植被或植被较少的斜坡土体上<sup>[3,10]</sup>,随降雨入渗、土壤含水量增加,这种结构受到破坏的土体就会逐渐失稳变形而发生滑坡。但此次滑坡侵蚀发生在林区内特大暴雨

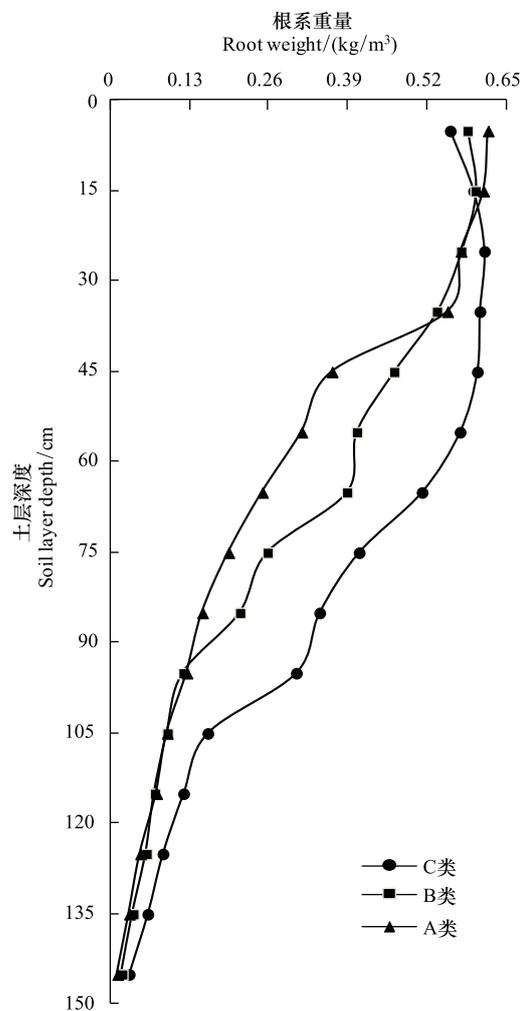


图 2 三类滑坡不同土层根系重量

Fig. 2 Root weight of three types of landslide at different soil layers

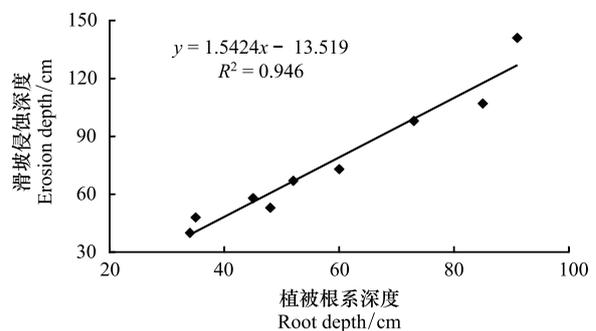


图 3 滑坡侵蚀深度与根系深度的关系

Fig. 3 Relationship between landslide depth and root depth

条件下,纵横交错的根系促进了滑坡侵蚀的发生,表现为植被及其根系对滑坡侵蚀的影响较强,而土壤含水量的影响相对较弱。这也是表4中植被根系与滑坡侵蚀强度相关系数高于土壤含水量与滑坡侵蚀强度的相关系数的主要原因。其次,虽然雨后只有表层土壤含水量会随时间发生变化,但分析时仍从整个剖面着手,这也可能是导致剖面整体土壤含水量与滑坡侵蚀强度的相关性较差的原因之一。

表4 滑坡侵蚀强度与影响因素的相关关系

Table 4 Correlation between landslide erosion intensity and observation indices

滑坡类型 Landslide type	滑坡侵蚀强度与各指标相关系数 Correlation coefficients between landslide erosion intensity and observation indices				
	根系重量 Root weight	土壤孔隙度 Soil porosity	土壤容重 Soil bulk density	土壤含水量 Soil water content	饱和土壤含水量 Saturated water content
A (n=15)	0.952 **	0.858 *	-0.909 **	0.076	0.502
B (n=15)	0.907 **	0.873 *	-0.901 **	0.449	0.591
C (n=15)	0.933 **	0.854 *	-0.899 **	0.575	0.618

\* \*. 相关性在0.01水平上显著(双尾)

通过表4可以判断影响滑坡侵蚀强度的主要因素依次为根系重量、土壤孔隙度和土壤容重。再者,滑坡侵蚀强度与根系重量、土壤孔隙度为正相关,与土壤容重为负相关,说明根系重量和土壤孔隙度对滑坡侵蚀强度有促进作用,而土壤容重则对滑坡侵蚀有抑制作用。但由于土壤孔隙度通过土壤容重计算得到,且通过其计算公式可推断出二者为负相关关系。即随土层加深呈现相反的变化趋势。通常情况下,浅层土壤,尤其是表层,由于能获得较多的热量和水分,使堆积于地表的枯枝落叶及地被物易于腐解,从而形成疏松多孔的土壤结构,因而表层土壤容重比较小。随着土壤层次加深,根系减少,土壤水分和通气性变差,地下生物活动减少<sup>[28]</sup>,土壤紧实度增加,土壤容重变大,土壤孔隙度减小。正是由于土壤孔隙度与土壤容重截然相反的变化趋势,导致二者与滑坡侵蚀强度的影响也表现出相反的作用。由于此次滑坡侵蚀大多位于沟缘线附近,坡度基本相同(多集中在35°—42°),可排除地形差异对滑坡侵蚀造成的影响。

此外,在研究区布设的大型林地径流小区(径流小区面积达1660 m<sup>2</sup>)尚未有径流发生(表1),说明林地在此次降雨过程中雨水全部下渗而无地表径流产生,因而可排除径流冲蚀对滑坡的影响。上述结果均表明,根系在影响此次暴雨滑坡侵蚀的诸因素中居主导地位。

#### 2.4 根系重量对滑坡侵蚀强度的影响

为分析各影响因素对滑坡侵蚀强度的影响,这里对根系重量、土壤孔隙度、土壤容重这三个指标进行相关分析,在此基础上进一步分析根系对滑坡侵蚀强度的影响。根系重量与土壤孔隙度呈极显著正相关,与土壤容重呈极显著负相关(表5),说明植被根系对土壤孔隙度和土壤容重都有影响,但对土壤孔隙度的变化为促进作用,而对土壤容重的变化为抑制作用。

表5 根系重量、土壤孔隙度、土壤容重三指标间相关关系

Table 5 Pearson correlation among root weight, soil porosity and soil bulk density

相关系数 Correlation coefficient	A类滑坡 Type A			B类滑坡 Type B			C类滑坡 Type C		
	根系重量 Root weight	土壤孔隙度 Soil porosity	土壤容重 Soil bulk density	根系重量 Root weight	土壤孔隙度 Soil porosity	土壤容重 Soil bulk density	根系重量 Root weight	土壤孔隙度 Soil porosity	土壤容重 Soil bulk density
根系重量 Root weight	1	0.873 **	-0.876 **	1	0.976 **	-0.914 **	1	0.916 **	-0.951 **
土壤孔隙度 Soil porosity	1	-0.863 **		1	-0.923 **		1	-0.948 **	
土壤容重 Soil bulk density			1			1			1

\*  $P < 0.01$  ( $n = 15$ )

表5中植被根系重量与土壤孔隙度、土壤容重之间的关系均表现为极显著相关,而且土壤孔隙度与土壤容重之间也存在极显著相关关系,表明土壤孔隙度与土壤容重受到根系重量的影响,且二者之间也存在相互

影响。因此,这里仅分析滑坡侵蚀强度与根系重量的关系。方程(4)是滑坡侵蚀强度与根系重量线性回归结果( $n = 15, R^2 = 0.845, sig < 0.001$ )。

$$M_s = 0.128R_w + 11.260 \quad (4)$$

式中, $M_s$ 为滑坡侵蚀强度( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); $R_w$ 为根系重量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

根系重量与滑坡侵蚀强度成正相关关系,表明此次暴雨滑坡过程中,植被根系重量不仅对滑坡发生发育具有促进作用,而且是影响此次暴雨滑坡侵蚀的主控因素。由于植被及其根系的存在,以及枯枝落叶腐解,林地土壤因存在丰富的孔隙,且孔隙之间具有开放性和连续性,成为径流入渗的优先通道<sup>[29]</sup>,并为土壤水的储蓄提供空间,这就使得林地根系层土体具有更大的储水能力。

研究发现,根系特征(根系深度、根系类型等)对土体稳定性方面具有重要影响<sup>[30-31]</sup>,主要表现为:穿插于土体的根系中,垂直方向的根系主要起锚固作用,水平方向的根系主要起牵拉作用。通过这种方式,整个根系层形成土壤和根系的复合体。当雨水及径流逐渐充满孔隙、裂隙等空间后,整个根系层便形成一个土壤水分暂时饱和的“饱和壳”<sup>[32]</sup>。一旦该饱和土体下滑力大于抗剪强度时,整个饱和层发生滑动,滑坡侵蚀强度也随之急剧增加。

此外,降雨过程中,裂缝、裂隙以及动物通道等在土体中也构成重要的降水输送通道,加快降雨入渗速率,这对滑坡的形成也起到了促进作用。

## 2.5 根系层土体土壤孔隙度与土壤容重差异分析

虽然根系重量是影响滑坡侵蚀强度的主控因素,但土壤孔隙度和土壤容重仍会对滑坡侵蚀强度产生一定影响。因此,通过对根系层土体—“饱和壳”上下层土壤之间土壤孔隙度差值(上层孔隙度值—下层孔隙度值)与土壤容重差值(下层容重值—上层容重值)进行分析,进一步解释植被根系通过改变土壤孔隙度与土壤容重而对滑坡侵蚀造成的影响。

图4和图5中土壤孔隙度差值与土壤容重差值变化趋势基本相同,且差值最大的土层即为土壤孔隙度和土壤容重发生明显变化的土层。对于三类滑坡类型,上下层土壤孔隙度和土壤容重差值出现最大土层依次为第4—5、6—7、8—9层,即草本植被滑坡壁土体在4—5层,即土层深度为40—50 cm时土壤孔隙度差值与土壤容重差值最大;灌丛植被滑坡壁土体在第6—7层,即土层深度为60—70 cm时土壤孔隙度差值与土壤容重差值最大;乔木植被滑坡壁土体在第8—9层,即土层深度为80—90 cm时土壤孔隙度差值与土壤容重差值最大。土壤孔隙度差值、土壤容重差值出现最大值的土层深度与各自对应植被类型的根系分布深度相近,且与对应的入渗深度、滑坡侵蚀深度相近。

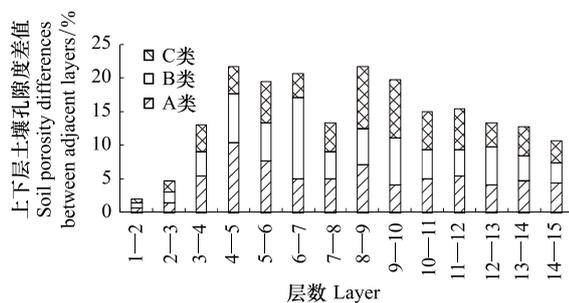


图4 三类滑坡上下层土壤孔隙度差值

Fig.4 Soil porosity differences between adjacent layers of three types of landslide erosion

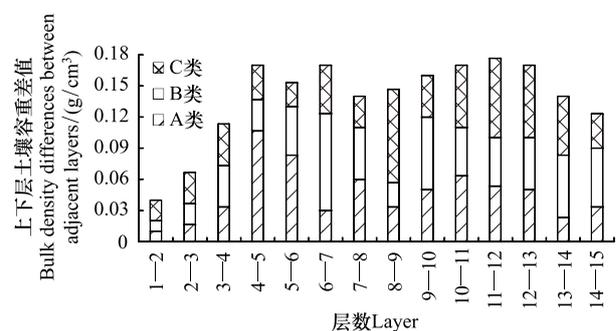


图5 三类滑坡上下层土壤容重差值

Fig.5 Soil bulk density differences between adjacent layers of three types of landslide erosion

草本、灌丛、乔木这3种植物的根系分别主要分布在0—40 cm、0—60 cm、0—80 cm土层。在这3个土层深度内,植被根系以及林下枯落物不仅减缓了径流流速,而且延长了降水在地表的存留时间。同时,疏松多孔

的根系层土壤结构,为增强土体入渗<sup>[33-34]</sup>,贮存更多水分而提供有利条件。然而随土壤深度增加,下层土体因根系减少而土壤孔隙度减小,土壤容重增大,形成一个相对不透水层(图4和图5)。此时,进入土体的雨水开始在不透水层以上积聚,并在不透水层之间形成滑动面<sup>[35]</sup>。随着降雨继续,不透水层以上部分—即根系层土体因吸纳大量降水而逐渐饱和,随着“饱和壳”不断软化,当其自重增大到致使下滑力大于抗剪强度时,整个根系层土体沿滑动面发生移动而导致滑坡侵蚀发生。

此外,黄土坡面沟缘线附近坡度较陡、土质相对比较均匀,为滑坡侵蚀发育提供了良好场所<sup>[36]</sup>。同时,乔木等高大植被的地上部分吸水作用和冠层降水截留作用导致植被自身重量增加,使土体下滑力增大,这也促进了滑坡侵蚀的发生<sup>[37]</sup>。

### 3 结语

(1)“7·21”暴雨引发的浅层滑坡侵蚀与植被类型密切相关,不同植被类型下滑坡侵蚀深度和滑坡侵蚀强度各不相同。以草本植被为主的A类滑坡的侵蚀深度集中在30—60 cm,侵蚀强度多集中在150—1200 kg/m<sup>2</sup>;以灌丛植被为主的B类滑坡的侵蚀深度集中在50—80 cm,侵蚀强度多集中在200—2000 kg/m<sup>2</sup>;以乔木植被为主的C类滑坡的侵蚀深度集中在80—100 cm;侵蚀强度集中在300—2800 kg/m<sup>2</sup>。

(2)此次暴雨滑坡侵蚀中,滑坡侵蚀强度与根系重量、土壤孔隙度、土壤容重密切相关,其中,根系重量对滑坡侵蚀强度的贡献率达80%以上,表明植被根系是影响此次暴雨滑坡侵蚀强度的主控因素。在暴雨、根系等因素综合作用下,根系层土体与下部紧实土体之间因水分差异形成水分饱和层。随土壤含水量增加,一旦根系层土体下滑力大于抗剪强度,上部的根系层土体就沿滑动面发生整体滑动。而且正是因为上述原因,才导致此次暴雨滑坡出现不同类型植被根系深度与侵蚀深度相近的侵蚀现象。此研究结果也说明了当降水量达到诱发林区滑坡灾害发生的临界值时,植被及其根系会加剧滑坡侵蚀的发生。对该方面进行研究,有助于重新认识植被固水保土、防灾减灾的作用,对水土保持林草措施布设具有借鉴意义。

(3)在今后的水土保持工作中,尤其是针对开发建设项目等边坡治理时,应根据特定地形、土壤等特点,因地制宜,合理配置乔灌草等各类植被,如:浅根型植被与深根型植被搭配;陡坡种植深根型植被,增加根系的固土深度,从而改善植被提高土体稳定性及防治水土流失的作用。在此基础上,可结合其它水土保持措施,如:修建坡面排水沟,同时利用自然沟道汇集径流,形成地面排水系统,从而加快地面排水;修建渗沟、盲沟等引出滞水及潜水来增加浅层地下排水,用以降低地下水位。通过上述方式,可更好地发挥植被的水土保持效益。

### 参考文献(References):

- [1] Chen C Y, Chen T C, Yu F C, Lin S C. Analysis of time-varying rainfall infiltration induced landslide. *Environmental Geology*, 2005, 48(4/5): 466-479.
- [2] Dahal R K, Hasegawa S, Nonomura A, Yamanaka M, Masuda T, Nishino K. GIS-based weights of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 2008, 54(2): 311-324.
- [3] 李媛, 孟晖, 董颖, 胡树娥. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, 15(2): 29-34.
- [4] 富县气象局. [2013-07-23]. <http://www.yaqx.com.cn/>.
- [5] 富县人民政府. [2013-07-31]. <http://www.fuxian.gov.cn/>.
- [6] 唐克丽, 郑粉莉, 张科利, 王斌科, 蔡庆, 王文龙. 子午岭林区土壤侵蚀与生态环境关系的研究内容和方法. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊*, 1993, (17): 3-10.
- [7] Nilaweera N S, Nutalaya P. Role of tree roots in slope stabilization. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1999, 57(4): 337-342.
- [8] 解明曙. 乔灌木根系固坡力学强度的有效范围与最佳组构方式. *水土保持学报*, 1990, 4(1): 17-24.
- [9] 王玉杰, 解明曙, 张洪江. 三峡库区花岗岩山地林木对坡面稳定性影响的研究. *北京林业大学学报*, 1997, 19(4): 7-11.
- [10] 徐永年. 人类活动及植被对坡体滑塌的影响. *泥沙研究*, 1999, (3): 33-39.

- [11] 王继武, 傅传元. 植被工程在黄土滑坡防治中的重要地位. 水土保持通报, 1984, (6): 38-41.
- [12] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态种植基试验研究. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 239-242.
- [13] 胡时友. 新型框格护坡的设计与实践. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 116-120.
- [14] Harris C, Davis M, Rea B. Geotechnical centrifuge modeling of mass movement processes associated with thawing permafrost soil. Landslides in Research, Theory and Practice, 2000, (2): 693-700.
- [15] Greenway D R. Vegetation and slope stability // Anderson M G, Richards K S, eds. Slope Stability-Geotechnical Engineering and Geomorphology. Chichester: Wiley, 1987: 187-230.
- [16] Gland T. Modeling landslide-triggering rainfall thresholds at a range of complexities // Proceeding 8th International Symposium Landslides. Cardiff, 2000, 2: 633-640.
- [17] 张咸恭, 王思敬, 张倬元. 中国工程地质学. 北京: 科学出版社, 2000.
- [18] 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.
- [19] 郑粉莉, 唐克丽, 王文龙, 白红英, 张科利, 查轩. 子午岭林区林地和开垦地土壤侵蚀特征研究. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993, (17): 29-36.
- [20] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径. 北京: 中国科学出版社, 1990.
- [21] 钟荫乾. 滑坡与降雨关系及其预报. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(4): 81-86.
- [22] 李鹏, 李占斌, 澹台湛. 黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征. 应用生态学报, 2005, 16(5): 849-853.
- [23] 秦娟, 上官周平. 子午岭林区山杨-辽东栎混交林的生理生态效应. 应用生态学报, 2006, 17(6): 972-976.
- [24] 刘秀萍, 陈丽华, 陈吉虎. 刺槐和油松根系密度分布特征研究. 干旱区研究, 2007, 24(5): 647-651.
- [25] 张信宝, 安芷生. 黄土高原地区森林与黄土厚度的关系. 水土保持通报, 1994, 14(6): 1-4.
- [26] 杨永红, 刘淑珍, 王成华. 土壤含水量和植被对浅层滑坡土体抗剪强度的影响. 灾害学, 2006, 21(2): 50-54.
- [27] 罗建杰. 植被对斜坡稳定性的积极作用和局限性. 价值工程, 2014, (16): 311-314.
- [28] 石风善. 多年生混播草坪土壤物理性质的研究. 草原与草坪, 2004, (2): 31-33.
- [29] 官琦, 徐则民, 田林. 植被发育玄武岩斜坡土体大孔隙尺寸及其主要影响因素. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2888-2896.
- [30] Tang Y, Bossard C, Reidhead J. Effects of percent cover of Japanese cedar in forests on slope slides in Sichuan, China. Ecological Engineering, 2015, (74): 42-47.
- [31] 黄圣瑞, 郑建荣, 袁安华. 根系含量对边坡稳定影响分析. 工程建设与设计, 2009, (6): 97-100.
- [32] 刘汉东, 党灿, 刘顺. 滑坡体在降雨条件下的稳定性分析. 人民黄河, 2012, 34(3): 65-67.
- [33] Onda Y, Yamamoto T. The mechanism for the infiltration lowering on soils with litter coverage. Journal of the Japanese Forestry Society, 1998, 80(4): 302-310.
- [34] 赵鸿雁, 吴钦孝, 从怀军. 黄土高原人工油松林枯枝落叶截留动态研究. 自然资源学报, 2001, 16(4): 381-385.
- [35] 彭书生, 王永波, 盛谦, 何庆华. 植被增加边坡降雨入渗对边坡稳定性影响研究. 地下空间与工程学报, 2007, 3(7): 1274-1278.
- [36] 郑艺贞. 漳州市山体滑坡主要影响因素分析. 福建地质, 2007, 26(4): 259-265.
- [37] 吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(2): 36-40.