

坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究

杨帆^{1,2} 程金花^{1,2} 张洪江^{1,2} 周柱栋^{1,2} 戴矜君^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.北京林业大学北京市水土保持工程技术研究中心,北京 100083)

摘要: 植被是影响坡面水力侵蚀过程的重要因素,深入理解草本植物坡面不同降雨和径流特性对土壤分离的作用 是研究土壤侵蚀动力学的基础。为此基于坡面土壤分离试验,通过定量测定 2 种草本植物草冠、根系对降雨和径 流的影响,研究了不同侵蚀力作用下的土壤分离特征。结果表明,草本植物对坡面径流和泥沙具有重要的调控作 用,相同覆盖度下狗尾草坡面的径流含沙量低于青蒿坡面($P<0.05$)。对比草本植物结构对坡面土壤分离的影响, 植物根系对坡面的减沙贡献率均高于其冠层($P<0.05$),其中,青蒿草冠对于坡面降雨的阻滞作用高于狗尾草草冠 ($P<0.05$),而狗尾草根系的减沙效益高于青蒿根系($P<0.05$),这主要与草本植物叶面积指数(LAI)及根系形态 分布有关,不同植物的根长密度与土壤分离率呈指数函数关系。坡面土壤分离过程受到侵蚀阻力的影响,在草本 植物覆盖坡面,随着植物覆盖度的增加,颗粒阻力和波阻力均呈增大趋势。降雨侵蚀力和径流剪切力是坡面土壤 分离的主要侵蚀动力,不同试验条件下草本植物对降雨和径流侵蚀力的降低值为 189.21 ~ 698.92 J·mm/(m²·min) 和 6.27 ~ 20.38 kg/(m·s²),减弱系数分别为 22.75% ~ 84.04% 和 19.68% ~ 63.97%。

关键词: 草本植物; 土壤分离; 侵蚀动力; 降雨击溅; 径流冲刷

中图分类号: S157.1; P426.615 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0129-09

Effect of Herb Plants on Soil Detachment and Erosion Dynamics

Yang Fan^{1,2} Cheng Jinhua^{1,2} Zhang Hongjiang^{1,2} Zhou Zhudong^{1,2} Dai Jinjun^{1,2}

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

2. Soil and Water Conservation of Beijing Engineering Research Center, Beijing 100083, China)

Abstract: Water erosion process is the interaction between erosion force of rainfall and runoff and soil resistance under the various factors, especially the vegetation plays a signification role, therefore, a better understanding of the effects of different raindrops and runoff characteristics on soil detachment of ground cover hillslope is basis to research soil erosion dynamics processes. A slope soil detachment experiment was conducted to reveal the slope erosion dynamic mechanism of herbs coverage. There erosion plots (0.5 m wide × 2 m long) which were composed of upslope sink (1.5 m long) and downslope soil box (0.5 m long) with average coverage of 0, 20% ~ 30%, 50% ~ 60% and 80% ~ 90% were installed. In order to research the quantitative influence of herbs structure on soil detachment rate and erosion dynamics, the experimental treatments separately measured the detachment effect of rainfall and runoff on slope soil. The results showed that the effect of herbs structure on soil detachment was different, and sediment reduction rate of roots was higher than the canopy ($P<0.05$). For two kinds of experimental herbs, the raindrops retardation coefficient of *Artemisia carvifolia* canopy is higher than that of *Setaria viridis* (L.) Beauv. canopy($P<0.05$), and the sediment reduction effect of roots is the opposite, the sediment reduction rate was decreased by 57.79% ~ 74.74% and 62.87% ~ 81.21%, respectively.

收稿日期: 2015-11-19 修回日期: 2015-12-28

基金项目: 北京高等学校青年英才计划项目(YETP0750)、国家自然科学基金项目(41271300,30900866)和中央高校基本科研业务费专项(2015ZCQ-SB-03)

作者简介: 杨帆(1988—),男,博士生,主要从事水土保持研究,E-mail: paper_yangfan@163.com

通信作者: 程金花(1979—),女,副教授,主要从事土壤侵蚀与植被恢复研究,E-mail: jinhua_cheng@126.com

This is mainly related to leaf area index and fibrous root content, and root length density and soil detachment rate present index function relation. Comparing with the soil detachment resistance characteristics, for the slope of herbs coverage, granule resistance and wave resistance were increased with the increasing vegetation coverage. The slope soil detachment dynamics mainly includes the rainfall and runoff, the herbs coverage on the influence of rainfall and runoff erosion dynamics are $189.21 \sim 698.92 \text{ J}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$ and $6.27 \sim 20.38 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$, respectively. The reduction coefficients were $22.75\% \sim 84.04\%$ and $19.68\% \sim 63.97\%$. This study reveals the important effect of ground cover on soil detachment from dynamic mechanism, aimed to provide basis research on the hillslope erosion dynamics.

Key words: herb plants; soil detachment; erosion dynamic; raindrops splashed; runoff scouring

引言

土壤侵蚀是威胁当今人类生存与发展的重要环境问题。作为坡耕地土壤侵蚀的主要方式,水力侵蚀造成了坡面表土和养分的大量流失^[1],其过程是各种因子影响下的降雨径流侵蚀力和土壤抗蚀力的相互作用。在坡面水力侵蚀过程中,土壤分离为坡面泥沙的输移提供了物质基础^[2],其侵蚀动力主要来自雨滴击溅和地表径流冲刷^[3],由于其复杂的物理过程,对于坡面侵蚀水动力因子和机理的研究一直受到广泛的关注。

目前,国内外学者对于裸露坡面侵蚀的发生发展过程、水动力学特征和土壤的抗蚀抗冲性,取得了丰富的研究成果^[4-7],为理解坡面土壤侵蚀动力学机理和建立侵蚀过程模型提供了理论基础。植树种草作为治理水土流失、改善生态环境的主要措施,能够有效降低雨滴能量、增加土壤入渗、减少径流量与泥沙量,研究表明,草本植物对降雨雨滴具有充分的拦蓄能力,与裸露坡面相比,草本植物覆盖坡面的水力侵蚀过程更为复杂。近年来,较多学者^[8-14]利用人工模拟降雨试验、坡面径流冲刷和天然降雨观测等方式,揭示草本植物在坡面侵蚀中的调控作用。但多集中于坡面径流对土壤分离及输移过程的影响上,对于雨滴击溅在坡面土壤分离过程中的贡献与作用研究尚不完善。雨滴侵蚀作为水力侵蚀的初始阶段,通过打击地表引起了土壤团粒间的破坏、分散,不仅破坏表层土壤结构,而且为径流挟带土粒创造条件。近年来,华北地区受季风气候影响,降雨季节一般具有高温多雨的特点,且高强度的暴雨几率增加,造成土壤的大量流失。因此,了解草本植物坡面雨滴击溅和地表径流土壤分离作用对研究坡面水力侵蚀过程有着重要的理论和实践意义。为揭示草本植物坡面的侵蚀动力机理,本文采用人工模拟降雨条件下的坡面土壤分离试验,定量测定不同降雨和径流对坡面土壤的分离作用,分析草本植物结构

对侵蚀动力的影响,评价其对降雨和径流的阻滞作用,以期深化坡面侵蚀动力机理的研究。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在北京林业大学人工降雨大厅进行,降雨设备为人工降雨大厅旋转下喷式人工降雨机,其有效降雨高度为 12 m,降雨分布均匀度达到 85% 以上。试验水槽长 1.5 m、宽 0.5 m、高 0.3 m,在水槽下端放置试供土槽,为长 0.5 m、宽 0.5 m、高 0.3 m 的有机玻璃方形容器。试验水槽表层用塑料薄膜遮盖,以确保水槽糙率的一致性,通过更换下方试供土槽研究不同试验条件对土壤分离过程的影响,在土槽尾部设置 V 型集流口收集坡面径流和泥沙,同时在底部设置出水孔,用于及时排除壤中流(图 1)。

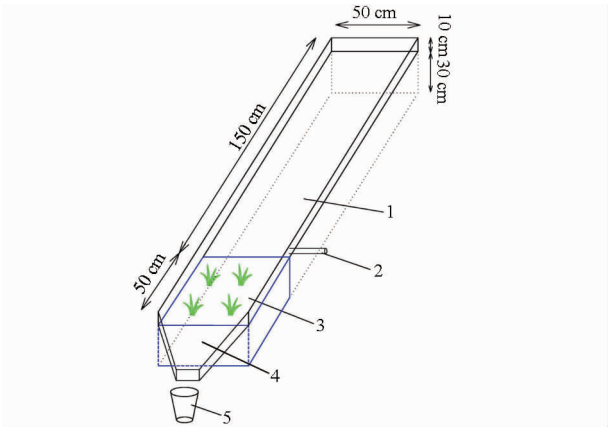


图 1 试验示意图

Fig.1 Sketch illustration of experiment

1. 坡面水槽 2. 出流管 3. 试供土槽 4. 集水面 5. 集流桶

试供土壤为取自鹫峰国家森林公园的普通褐土,是北京地区主要土壤类型之一^[15]。为保证试验用土的一致性,避免回填造成土槽内土质的差异,在研究区选择典型裸露坡面,通过剔除表层砾石等杂物确保坡面的平整性,采用试验土槽挖取表层 30 cm 原状土作为试验用土。试验选择当地常见的青蒿(*Artemisia carvifolia*)和狗尾草(*Setaria viridis* (L.)

Beauv.) 2 种不同根系草本植物作为研究对象。

1.2 试验设计

根据当地实际降雨情况,在坡度为 15°的条件下,设定裸地土槽降雨强度为 30、60、90 mm/h,草本覆盖土槽降雨强度为 60 mm/h,降雨持续时间均为 60 min。在试验坡面通过土槽内有无雨滴和径流冲刷,分别确定降雨和径流对坡面土壤的分离作用,其中无雨滴打击采用在试验土槽上方架设纱网(孔径 1 mm×1 mm)的方式来屏蔽雨滴的击溅作用^[16],纱网距土壤表面 10 cm;无坡面径流冲刷采用在水槽上方进行雨布遮盖并放置隔板,将坡面径流从水槽侧面引出的方式,避免其对试供土槽的影响。

为研究草本植物覆盖对降雨和径流侵蚀力的影响,在土槽内(0.5 m×0.5 m×0.3 m)种植 2 种草本植物,植被覆盖度分别为 20%~30%、50%~60%、80%~90%。为确保植物生长符合试验设计,首先

通过调查 2 种草本植物单株生长量及覆盖度确定最优种植密度,然后采用条带状在单位面积上均匀种植草种,出苗 2 周后进行定苗,在植物生长期保证其充足的日晒时间,使植被盖度最大化,符合试验控制要求。降雨试验前,结合图像处理方法^[17]确定土槽内草被的实际盖度,清除不符合条件的植株,同时,对土槽内的土壤基本性质进行测定(表 1),并采用 LI-2000 冠层分析仪测量草本植物叶面积指数(LAI)。

植物减少坡面侵蚀受到地表植被和地下根系的共同作用,为区分二者对坡面土壤的减蚀作用,待草本植物不同覆盖度降雨试验完成后,减去地上茎叶部分只保留根系,进行相同的坡面降雨试验。试验完成后,收集地上茎叶部分和地下根系,测量根系基本特征。为确保试验的可靠性,每个试验处理均有 2 组重复,试验共计使用原状土槽 21 个。

表 1 试供土壤理化性质
Tab.1 Basic properties of experiment soil

土层厚度 /cm	土壤容重 /(g·cm ⁻³)	砂粒质量 分数/%	粉粒质量分数 /%	粘粒质量分数 /%	土壤质地	有机质质量比 /(g·kg ⁻¹)	大于 0.25 mm 水稳性团聚体 质量分数/%
0~30	1.13±0.23	61.81	24.36	13.83	砂壤土	8.28±0.68	28.47±1.72

注:表中数据表示形式为平均值±标准差。下同。

1.3 试验方法

研究表明,前期土壤含水率对坡面地表径流的产生和泥沙输移有较大的影响^[18]。在试验开始前,对所有试验土槽进行充分降雨,使土壤基本饱和但不产生径流,静置 24 h 后进行降雨试验,试验样地前期土壤体积含水率为(18.13±1.50)%。

在坡面试验时,待降雨强度稳定后方可进行试验,在坡面产流后记录时间,同时接管径流泥沙样,取样间隔为每 2 min 一次,待降雨 10 min 后改为每 5 min 取样一次。降雨过程中采用染色剂示踪法分别测定水槽和土槽的坡面流速,将实测数据乘以修正系数 0.75,求得坡面的平均流速^[10],同时用精度为 0.02 mm 的测针测量水槽和土槽末端的坡面水深,每个参数采用多次重复测量取平均值。降雨结束后,向径流泥沙水样中加入少量明矾加快泥沙沉淀,待水样澄清后,通过土工布过滤泥沙样,称量清液体积,然后将泥沙样移入铝盒中,将其置于烘箱 105℃ 下干燥 24 h,称量泥沙质量。

1.4 数据分析

1.4.1 坡面减沙贡献率和降雨阻滞系数

试验过程中,由于草本植物处于生长期,坡面基本没有枯落物,所以草本植物对坡面土壤的分离影

响仅为草冠和根系,草冠对坡面降雨和径流侵蚀动力的影响为整株草本植物的作用减去根系作用^[12]。其中,草本植物草冠和根系减沙贡献率的计算公式为

$$R_s = S_s / S_p \times 100\%$$
 (1)

$$R_r = S_r / S_p \times 100\%$$
 (2)

式中 R_s ——草冠减沙贡献率
 R_r ——根系减沙贡献率
 S_p 、 S_s 、 S_r ——整株草本植物、草冠和根系的减沙率

草冠对降雨的阻滞系数计算式为

$$K = (V_b - V_c) / P$$
 (3)

式中 K ——草冠对降雨的阻滞系数
 V_b ——仅有根系的坡面径流量,mm
 P ——试供土槽内降雨量,mm
 V_c ——不同植被盖度下的径流量,mm

1.4.2 坡面侵蚀力及阻力计算

WISCHMEIER 等^[19]提出以降雨动能和最大 30 min 雨强的乘积作为降雨侵蚀力指标,具体为

$$R = \sum EI_{30}$$
 (4)

式中 R ——次降雨侵蚀力,J·mm/(m²·min)
 $\sum E$ ——次降雨总动能,J/m²

I_{30} ——30 min 最大降雨强度,mm/min

在本试验降雨过程中,降雨强度保持不变,最大降雨强度为设计降雨强度,对于降雨动能采用 Parsivel 雨滴谱仪进行测定。

试验坡面径流剪切力计算公式为

$$\tau = VR_aJ \tag{5}$$

式中 τ ——水流剪切力,kg/(m·s²)

V ——水流重度,N/m³

R_a ——水力半径,m

J ——水流能坡,%

由于坡面水流为典型的薄层水流,所以采用径流深 h 和地面坡度 S 正弦值替换 R_a 和 J ^[3]。水的重度指的是单位体积水的质量,计算公式为

$$V = \rho g \tag{6}$$

式中 ρ ——水的密度,kg/m³

g ——重力加速度,m/s²

坡面阻力主要有 4 个来源:即颗粒阻力 f_g 、形态阻力 f_f 、波阻力 f_w 和降雨阻力 f_r ,并且这些阻力是可以相互叠加的^[20-21],因此,坡面阻力计算公式为

$$F = f_g + f_f + f_w + f_r \tag{7}$$

其中

$$f_g = 3.19Re^{-0.45}$$

$$f_f = 4.8 \sum A_i/A_b$$

$$f_w = 2.8C$$

式中 Re ——雷诺数

A_i ——局部地形改变后的面积,m²

A_b ——过水断面总面积,m²

C ——地表覆盖度,%

吴普特等^[22]通过有无雨滴打击试验对比分析,得出了雨滴打击作用对坡面薄层水流的阻力系数,本试验采用相同的处理方式来计算降雨阻力 f_r ,具体计算公式为

$$f_r = f_R - f_D \tag{8}$$

$$f = 8gh\sin\alpha/v^2 \tag{9}$$

式中 f_r ——降雨阻力

f_D ——雨滴击溅作用下的水流阻力系数

f_R ——无雨滴击溅作用下的水流阻力系数

f ——薄层水流阻力系数

h ——薄层水流厚度,cm

α ——坡度 v ——坡面流速,cm/s

1.5 数据处理

数据处理采用 Excel 软件进行,使用 Origin 9.0 软件作图,利用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小差异显著法(LSD)比较各参数间差异($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 坡面土壤分离过程的影响因素

2.1.1 降雨和径流对坡面土壤分离的影响

对于不同试验组合,坡面土壤的分离过程受到降雨和径流的影响,从动力学角度分析,其实质是降雨侵蚀力和径流剪切力的作用,试验通过土槽上方有无雨滴打击及径流冲刷分别研究雨滴侵蚀力和径流剪切力对坡面土壤分离的影响。

图 2 为 60 mm/h 降雨强度下裸露坡面降雨和径流对土壤分离过程的影响,在坡面侵蚀过程中,径流引起的土壤分离率均大于雨滴引起的土壤分离率。通过对比土壤分离过程曲线,发现雨滴和径流影响下坡面土壤分离的变化趋势较为相近,2 种侵蚀方式引起的土壤分离率均呈波动增加趋势。雨滴击溅作用下,随着持续降雨土槽坡面形成薄层水流,表层疏松分散的土壤颗粒随径流被输移,引起土壤分离率的增加;当土槽坡面处于径流冲刷时,降雨初期坡面即迅速形成小细沟,侵蚀方式以微弱细沟侵蚀为主^[16],因此,径流冲刷试验的土壤分离率较高。随着降雨历时的增加,细沟侵蚀逐渐成为雨滴打击试验处理的主要侵蚀方式,坡面土壤分离率逐渐增加;在径流冲刷试验中,随着径流水动力条件的增加受到限制,坡面土壤分离率变化趋于稳定。而且,径流冲刷条件下坡面土壤的分离率高于雨滴打击作用,这与试验采用的土槽坡面较短而径流冲刷水槽较长有关。

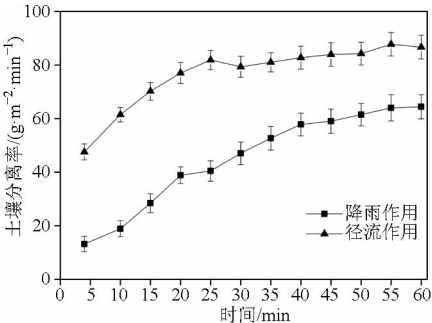


图 2 60 mm/h 坡面降雨和径流对土壤分离过程的影响

Fig.2 Effect of rainfall and runoff on soil detachment at 60 mm/h

坡面土壤分离是土壤自身性状和外在侵蚀动力综合作用的结果,在裸露坡面土壤基本性质相同的情况下,雨滴侵蚀力和径流剪切力是坡面土壤分离的主要动力。在 30、60、90 mm/h 降雨强度下,降雨侵蚀力为 189.12、831.61、1 927.82 J·mm/(m²·min);径流剪切力分别为 19.12、31.86、44.61 kg/(m·s²)。通过回归分析 3 种降雨强度下不同雨滴侵蚀力和径流剪切力对坡面的土壤分离情况,可知土壤分离率与

两种侵蚀动力具有关系

$$D_r = 0.311\tau + R^{0.608} \quad (R^2 = 0.912) \quad (10)$$

式中 D_r ——土壤分离率, $g/(m^2 \cdot min)$

2.1.2 草本植物对坡面土壤分离的影响

与裸露坡面相比,随着地表植物覆盖度的增加坡面含沙量呈减弱趋势,研究表明,草本植物对于坡面径流和泥沙具有一定的调控作用^[12],主要是由于植被地上部分对降雨和径流的截留及其根系对土壤的固持作用。不同覆盖度草本植物结构对坡面含沙量的影响如图3所示,在同一草本覆盖度下,狗尾草坡面的含沙量均小于青蒿坡面($P < 0.05$)。

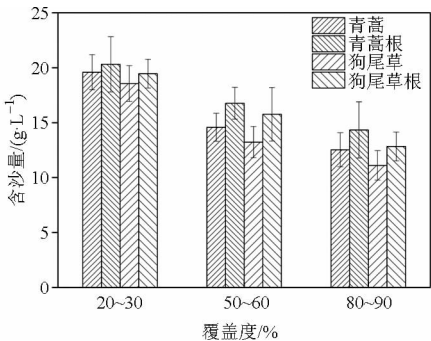


图3 不同覆盖度草本植物结构对坡面含沙量的影响
Fig.3 Effect of herb plants structures with different coverage on sediment content

草本植物对坡面泥沙的调控来自其冠层和根系的共同作用,从草本植物结构来看,草冠和根系对坡面土壤分离的影响存在一定的差异。草本植物草冠和根系对减少坡面泥沙的效益如图4所示,2种草本植物根系的减沙贡献率均高于其冠层($P < 0.05$),表明草本植物根系对于土壤分离过程的影响较大,其中,青蒿根系的减沙贡献率为57.79%~74.74%,狗尾草根系的减沙贡献率为62.87%~81.21%。吴钦孝等^[23]通过对草本植物采用保留和去掉茎叶的处理方式,观测发现茎叶对抑制土壤冲刷的效果并不明显。赵春红等^[12]从水动力学角度探讨了牧草根系和冠层对坡面土壤侵蚀的调控,研究表明根系抵抗水流冲刷和搬运的能力要远大于冠层,可见,草本植物主要是靠根系作用提高土壤的抗冲刷能力。在不同试验组合中,青蒿和狗尾草根系对坡面具有良好的固土作用,一方面试验所选草本植物为一年生草本,根系生长快速,通过其在土壤颗粒中的穿插缠绕,增强了土壤的抗侵蚀能力;另一方面,根系产生的分泌物可以胶结土壤颗粒,形成较为稳定的土壤团聚结构,从而促进土壤的抗冲刷能力^[24]。

2.2 草本植物对降雨和径流的阻滞效应

2.2.1 草本植物对降雨和径流的影响

草本植物对坡面土壤分离的影响主要是通过草

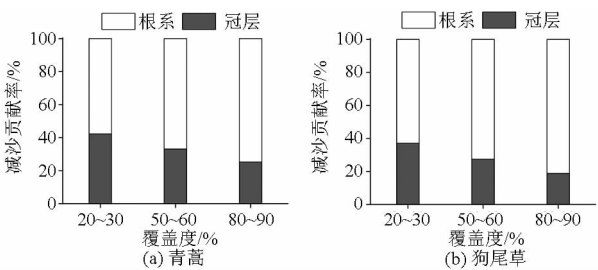


图4 2种草本植物冠层与根系的减沙效益
Fig.4 Herb plants canopy and root contribution ratios on reducing of sediment

冠和根系对降雨和径流的阻滞作用,图5为不同试验组合下草冠对降雨的阻滞系数,在同一草本覆盖度下,青蒿草冠对于坡面降雨雨滴的阻滞作用高于狗尾草草冠($P < 0.05$)。在降雨过程中,草本植物叶面对降落雨滴动能的削弱作用明显,其坡面表层土壤的分离主要是降雨过程中的穿透雨滴引起的,相同覆盖度下两种草本植物的叶面数量、冠层结构变化、叶片生命活性等之间的不同,导致了草冠对雨滴动能削弱的差异性。从不同覆盖度下草本植物的叶面积指数(LAI)来看,青蒿冠层平均叶面积指数分别为0.28、0.88、2.11,狗尾草冠层平均叶面积指数分别为0.21、0.53、1.83,不同覆盖度下青蒿的叶面积指数均大于狗尾草($P < 0.05$),由于青蒿地上部分多分枝且具有较厚的冠层结构,因此相对于狗尾草草冠对雨滴动能有较好的削弱作用,有利于拦截降雨延长入渗时间。

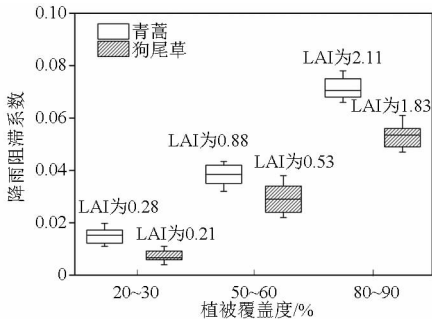


图5 不同试验组合下草冠对降雨的阻滞系数
Fig.5 Raindrops retardation coefficients of herb plants under different experiments

植物对于坡面径流的阻滞作用主要来自其茎秆和根系,由于草本植物茎秆部分较短,因此在本试验中重点关注草本植物根系对径流及土壤分离的影响。根系对土壤水力学性质的影响取决于根系在体中的缠绕和分布状况^[25],不同试验组合中植物根系特征如表2所示。在植物根系提高土壤侵蚀能力的研究中,吴彦等^[24]指出,植物根系能够提高土壤的抗侵蚀能力主要是通过根径 $d \leq 1\text{ mm}$ 的须根发挥作用的,蒋定生等^[26]对 $d \leq 1\text{ mm}$ 的根系在土体中的

分布密度与土壤抗冲性进行统计分析,发现土壤抗冲性与 $d \leq 1\text{ mm}$ 的根系分布密度呈指数关系。比较不同试验组合下植物根系 $d \leq 1\text{ mm}$ 的根长占比,发现狗尾草根系 $d \leq 1\text{ mm}$ 的根长占比大于青蒿根系 ($P < 0.05$),从植物根系的分类来看,试验采用的 2 种草本植物中,青蒿为直根类植物,狗尾草为须根类植物,因此,狗尾草根系的减沙效益在一定程度上要高于青蒿根系(图 4)。此外,根长密度可以反映植物根系的生长活力,根长密度越大,表示其吸收土

壤养分、水分的表面积越大,同时也表明其抵抗土壤侵蚀的能力越强。图 6 为不同草本植物根长密度下的土壤分离率,不同试验组合下的土壤分离率是根系对于坡面径流剪切力的阻滞作用的体现,对不同植物的根长密度与土壤分离率进行回归分析,坡面土壤分离率与根长密度呈现 $D_r = ae^{-br}$ 的指数函数关系,这与 MAMO 等^[27]的研究结论一致。随着根长密度的增加,草本植物根系对坡面径流的阻滞作用明显,降低了坡面土壤分离率。

表 2 不同试验组合植物根系特征
Tab.2 Root characteristics of experimental treatments

试验组合	根系生物量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	根系体积/ cm^3	根表面积/ cm^2	根长密度/($\text{m}\cdot\text{m}^{-3}$)	小于 1 mm 根长占比/%
青蒿 A	144.26 ± 8.24	8.42 ± 2.24	29.12 ± 5.12	33.56 ± 9.86	17.24 ± 3.24
青蒿 B	232.96 ± 12.24	14.39 ± 1.54	53.09 ± 7.23	78.18 ± 5.03	20.24 ± 4.08
青蒿 C	328.82 ± 16.57	28.06 ± 3.54	81.56 ± 11.54	120.86 ± 11.26	16.24 ± 2.12
狗尾草 A	123.81 ± 6.54	3.97 ± 1.54	13.49 ± 3.24	60.09 ± 7.88	26.22 ± 4.34
狗尾草 B	186.28 ± 11.21	9.58 ± 2.17	32.86 ± 8.21	102.89 ± 10.64	28.24 ± 2.12
狗尾草 C	291.24 ± 13.57	15.24 ± 2.45	46.12 ± 10.22	147.45 ± 5.33	32.16 ± 3.21

注: A、B、C 分别代表草本植物覆盖度为 20% ~ 30%, 50% ~ 60%, 80% ~ 90%。下同。

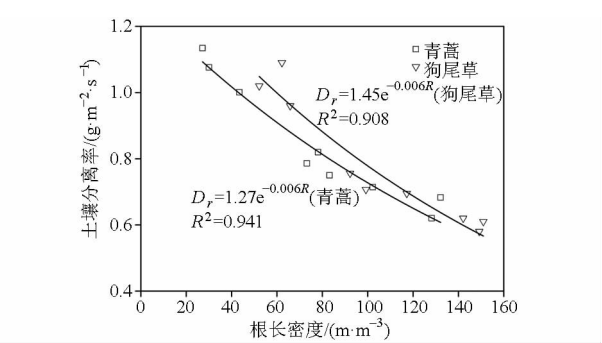


图 6 土壤分离率与根长密度的关系

Fig.6 Relationship between soil detachment rate and roots

2.2.2 草本植物坡面的阻力特征

草本植物对于坡面土壤分离的抑制作用主要表现为降低雨滴动能和坡面径流冲刷,以此来改变坡面土壤分离的侵蚀动力,减少其对表土的侵蚀作用。目前,较多学者根据地表特征差异将坡面侵蚀阻力来源分为 4 部分^[20-21],即颗粒阻力 f_g 、形态阻力 f_f 、波阻力 f_w 和降雨阻力 f_r 。其中,颗粒阻力 f_g 是坡面无措施的裸露坡地因土壤颗粒间的粘结力而引起的

水流阻力;形态阻力 f_f 与实际过水面积和坡面的总面积成正比;波阻力 f_w 与植被覆盖度呈正比;降雨阻力 f_r 是雨滴打击造成水流延迟产生的相应附加阻力。因此,整个坡面的阻力可由式(7)、(8)进行计算,表 3 为不同试验组合下草本植物坡面的阻力系数特征值。由表 3 看出,裸露坡面的坡面阻力包括颗粒阻力、形态阻力和降雨阻力;在草本植物覆盖坡面,随着覆盖度的增加,颗粒阻力和波阻力呈现增加趋势;对比 2 种草本植物的阻力系数,发现狗尾草坡面颗粒阻力和波阻力均高于青蒿坡面 ($P < 0.05$),这与草本植物间草冠和根系的分布形态特征有关。

坡面径流泥沙含量与坡面水流受阻力情况关系密切,图 7 为坡面阻力系数与土壤分离率的关系。坡面水流受阻力作用越大,其被拦蓄入渗含量越多,因此坡面土壤分离率越低,坡面阻力系数 f 与土壤分离率 D_r 的拟合方程为

$$D_r = 0.318\ln F + 1.022 \quad (R^2 = 0.865) \quad (11)$$

表 3 不同试验组合下坡面阻力系数特征值
Tab.3 Resistance characteristics of experimental treatments

试验组合	颗粒阻力 f_g	形态阻力 f_f	波阻力 f_w	降雨阻力 f_r	坡面阻力 F
裸坡	0.15 ± 0.05	0.25	0	0.13	0.53 ± 0.05
青蒿 A	0.18 ± 0.04	0.25	0.59 ± 0.02	0.13	1.15 ± 0.06
青蒿 B	0.22 ± 0.04	0.25	1.48 ± 0.03	0.13	2.08 ± 0.07
青蒿 C	0.25 ± 0.05	0.25	2.29 ± 0.06	0.13	2.92 ± 0.11
狗尾草 A	0.19 ± 0.02	0.25	0.64 ± 0.04	0.13	1.21 ± 0.06
狗尾草 B	0.27 ± 0.05	0.25	1.66 ± 0.01	0.13	2.31 ± 0.06
狗尾草 C	0.30 ± 0.07	0.25	2.46 ± 0.02	0.13	3.14 ± 0.09

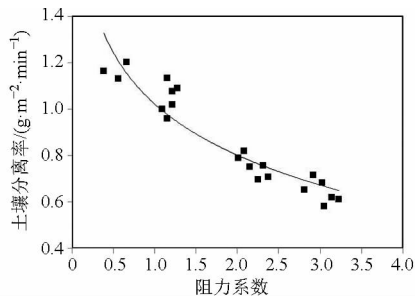


图 7 坡面阻力系数与土壤分离率的关系
Fig. 7 Relationship between soil detachment rate and resistance coefficient

通过量化不同试验条件坡面的阻力系数特征值,揭示草本植物坡面下的阻力分布情况,结果表明,土壤分离过程与表层土壤颗粒的组成及坡面水动力学特性密切相关。随着草本植物覆盖度的增加,草冠可以有效保护坡面土壤不受雨滴打击,增大坡面降雨阻力;在本试验中,径流冲刷是引起土壤分离的主要因素,草本植物通过根系特征影响坡面径流的形成和汇流,引起坡面水动力学特征的变化,通过提高下垫面的粗糙度增大坡面阻力系数,以此对坡面土壤形成有效保护,降低坡面土壤的分离速率。

2.3 草本植物对坡面降雨和径流侵蚀力的影响

分析坡面侵蚀的物理学过程,一方面降雨雨滴动能转化为垂直于地表的击溅侵蚀力和平行于坡面的剪切力,土壤团聚体的分散主要受到击溅侵蚀力的作用,而剪切力和重力作用使土粒发生位移;另一方面,坡面径流引起的土壤的分离率与径流切应力和土壤颗粒分散的临界切应力有关,NEARING等^[28]认为当径流中的含沙量小于径流输沙能力且坡面径流侵蚀力大于土壤颗粒分散的临界切应力时,径流造成坡面土壤的分离。

AFSHIN 等^[29]认为植被覆盖度 (G_c) 在数值上表示坡面土壤受到保护避免雨滴直接打击的部分,坡面裸露面积百分比 $(1 - G_c) \times 100\%$ 可以用来预测总坡面土壤的潜在分离情况,因此,在不同试验条件下草本植物对于坡面降雨侵蚀力的减少与植物的覆盖度成正比,计算公式为

$$\Delta R = RG_c \tag{12}$$

式中 ΔR ——草本植物对降雨侵蚀力的降低值
 G_c ——植被覆盖度

对于坡面径流侵蚀力,通过分别在试验过程中测量水槽末端和土槽末端的水动力学参数,以此来计算草本植物对于坡面径流侵蚀力的影响,计算式为

$$\Delta \tau = \tau_1 - \tau_2 \tag{13}$$

式中 $\Delta \tau$ ——草本植物对径流剪切力的降低值
 τ_1 ——水槽末端径流剪切力

τ_2 ——土槽末端径流剪切力

不同试验组合下草本植物对坡面降雨和径流侵蚀力的影响如表 4 所示,随着植被覆盖度增加草本植物对降雨侵蚀力的降低值为 $189.21 \sim 698.92 \text{ J}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{min})$,对径流侵蚀力的降低值为 $6.27 \sim 20.38 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$,减弱系数分别为 $22.75\% \sim 84.04\%$ 和 $19.68\% \sim 63.97\%$ 。

表 4 草本植物对坡面降雨和径流侵蚀力的影响
Tab. 4 Impact of grass on rainfall and runoff erosion force

试验组合	$\Delta R/(\text{J}\cdot\text{mm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1})$	$\Delta \tau/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2})$
青蒿 A	216.55 ± 7.87	6.27 ± 1.04
青蒿 B	456.67 ± 12.23	14.02 ± 2.02
青蒿 C	698.92 ± 19.62	17.83 ± 2.13
狗尾草 A	189.21 ± 10.06	7.64 ± 0.95
狗尾草 B	432.33 ± 15.72	16.57 ± 1.83
狗尾草 C	685.54 ± 21.38	20.38 ± 2.21

综上所述,草本植物对坡面表层的保护主要有以下两方面:一是通过草冠层叶片减少降雨雨滴打击,二是通过根系部分拦蓄地表径流固持坡面土壤。从动力机理角度分析,草本植物通过影响降落雨滴的击溅侵蚀力和坡面径流剪切力,在一定程度上减弱了坡面土壤的分离,表明草本植物对坡面土壤分离和运输过程的重要作用。在实际生产当中,种植草本植物作为常见的水土保持措施被广泛应用,试验表明,不同草本植物类型及草被覆盖度对坡面侵蚀动力的影响具有差异,因此,通过合理选取草本植物种类和覆盖度优化对坡面土壤的保护作用,这对于提高水土保持效益具有重要意义。

3 结论

(1)研究表明,不同试验组合中草本植物对坡面土壤分离的影响主要是通过草冠、根系对降雨和径流的阻滞作用。其中,2 种草本植物根系的减沙贡献率均高于其冠层 ($P < 0.05$),表明草本植物根系对于土壤分离过程的影响较大。在降雨过程中,草本植物叶面对降落雨滴动能的削弱作用明显,这主要与草本植物的叶面数量、冠层结构变化等有关,而草本植物根系主要通过根径 $d \leq 1 \text{ mm}$ 的须根发挥固持土壤的作用,而且不同植物的根长密度与土壤分离率呈现 $D_r = ae^{-br}$ 的指数函数关系。

(2)坡面土壤的分离过程受到降雨和径流的影响,从动力学角度分析,其实是降雨侵蚀力和径流剪切力的作用。分析坡面侵蚀阻力来源,其中,裸露坡面阻力包括颗粒阻力、形态阻力和波阻力,而在草本植物覆盖坡面,随着植物覆盖度的增加,坡面颗粒

阻力和波阻力均呈现增加趋势。由于坡面草本植物的存在,随着植被覆盖度的增加,草本植物对降雨和径流侵蚀力有明显的削弱作用,进而在一定程度上降低坡面土壤分离的侵蚀动力,起到保护坡面表层土壤的作用,从动力机理角度揭示了植被对于土壤分离的重要作用。

参 考 文 献

1 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J].土壤学报,1989,26(2):109-116.
ZHENG Fenli, TANG Keli, ZHOU Peihua. Study on factors affecting rill erosion on cultivated slope land[J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(2): 109-116. (in Chinese)

2 柳玉梅,张光辉,李丽娟,等.坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J].农业工程学报,2009,25(6):96-99.
LIU Yumei, ZHANG Guanghui, LI Lijuan, et al. Quantitative effects of hydrodynamic parameters on soil detachment capacity of overland flow[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 96-99. (in Chinese)

3 何小武,张光辉,刘宝元.坡面薄层水流的土壤分离实验研究[J].农业工程学报,2003,19(6):52-55.
HE Xiaowu, ZHANG Guanghui, LIU Baoyuan. Soil detachment by shallow flow on slopes[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 52-55. (in Chinese)

4 ABRAHAMS A D, PARSON A J. Hydraulics of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces[J]. CATENA, 1994, 23(1-2):111-140.

5 DUNNE T, ZHANG W H, AUBRY B F. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff[J]. Water Resource Research, 1991, 27(9): 2271-2285.

6 GABET E J, DUNNE T. Sediment detachment by rain power[J]. Water Resource Research, 2003, 39(1):ESG1-1-ESG1-12.

7 王军光,李朝霞,蔡崇法,等.坡面流水力学参数对团聚体剥蚀程度的定量影响[J].水科学进展,2012,23(4):502-507.
WANG Junguang, LI Zhaoxia, CAI Chongfa, et al. Quantitative effects of hydro-dynamic parameters on abrasion extent aggregates by overland flow[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(4):502-507. (in Chinese)

8 潘成忠,马岚,上官周平.含沙量对草地坡面径流泥沙沉积和水力特性的影响[J].水科学进展,2008,19(6):857-862.
PAN Chengzhong, MA Lan, SHANGGUAN Zhouping. Influence of sediment concentration on deposition of silt and runoff hydraulics on grassland[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6):857-862. (in Chinese)

9 姚文艺,肖培青,申震洲,等.坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系[J].水利学报,2011,42(12):1438-1445.
YAO Wenyi, XIAO Peiqing, SHEN Zhenzhou, et al. Responses of runoff process and threshold of sediment generation for different vegetation-covered plot[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(12): 1438-1445. (in Chinese)

10 肖培青,姚文艺,申震洲,等.苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J].水利学报,2011,42(2):232-237.
XIAO Peiqing, YAO Wenyi, SHEN Zhenzhou, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 232-237. (in Chinese)

11 甘卓亭,叶佳,周旗,等.模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J].生态学报,2010,30(9):2387-2396.
GAN Zhuoting, YE Jia, ZHOU Qi, et al. Effects of grass vegetations on the processes of soil erosion over slope lands in simulated rainfalls[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9):2387-2396. (in Chinese)

12 赵春红,高建恩,徐震.牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理[J].应用生态学报,2013,24(1):113-121.
ZHAO Chunhong, GAO Jianen, XU Zhen. Mechanisms of grass in slope erosion control in loess sandy soil region of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1):113-121. (in Chinese)

13 AFSHIN G, YOSHIHARU I, TAKASHI G, et al. Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope: a plot-scale study[J]. CATENA, 2011, 85(1):37-47.

14 FATTETAM, FU Y, GHESTEMC M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: relationship between aggregate stability and shear strength[J]. CATENA, 2011, 87(1):60-69.

15 程金花,秦越,张洪江,等.华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J].农业机械学报,2015,46(2):153-161.
CHENG Jinhua, QIN Yue, ZHANG Hongjiang, et al. Splash erosion under artificial rainfall in rocky mountain area of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):153-161. (in Chinese)

16 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J].农业机械学报,2015,46(8):104-112.
SHEN Haiou, ZHENG Fenli, WEN Leilei, et al. Effects of raindrop impact on rill erosion characteristics on Loess Hillslope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 104-112. (in Chinese)

17 章文波,刘宝元,吴敬东.小区植被覆盖动态快速测量方法研究[J].水土保持通报,2001,21(6):60-63.
ZHANG Wenbo, LIU Baoyuan, WU Jingdong. Monitoring of plant coverage of plots by visual estimation and overhead photograph [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(6):60-63. (in Chinese)

18 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等.前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(3):95-103.
MA Renming, CAI Chongfa, LI Zhaoxia, et al. Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozems[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3):95-103. (in Chinese)

19 WISCHMEIER W H, SMITH D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions of American Geophysical Union, 1958, 39(3): 285-291.

20 ABRAHAMS A D. Rill hydraulics on a semi-arid hillslope, Southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(1): 35 – 47.

21 吴淑芳,吴普特,原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报,2010,26(3):14 – 19.
WU Shufang, WU Pute, YUAN Lifeng. Runoff regulation by thin-layer flow mechanical characteristics testing[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 14 – 19. (in Chinese)

22 吴普特,周佩华. 黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996, 2(1):40 – 45.
WU Pute, ZHOU Peihua. Research on the sheet flow erosion of Loess surface[J]. Journal of Soil Erosion and Soil Conservation, 1996, 2(1): 40 – 45. (in Chinese)

23 吴钦孝,李勇. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究:Ⅱ. 草本植物根系提高表层土壤抗菌素冲刷力的试验分析[J]. 水土保持学报,1990,4(1):11 – 16.
WU Qinxiao, LI Yong. A study on soil anti-scourability increased by root system of plant in the loess plateau. Ⅱ. An experimental study on top soil anti-scourability increased by root system of herbs[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 4(1): 11 – 16. (in Chinese)

24 吴彦,刘世全,王金锡. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 应用与环境生物学报,1997,3(2):119 – 124.
WU Yan, LIU Shiquan, WANG Jinxi. Effect of plant root system on soil anti-erosion[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 1997, 3(2): 119 – 124. (in Chinese)

25 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 土壤与环境,2001,10(3):250 – 252.
WANG Ku. Effects of plant roots on soil anti-erosion[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(3): 250 – 252. (in Chinese)

26 蒋定生,范兴科,李新华,等. 黄土高原水土流失严重区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J]. 水土保持学报,1995, 9(2):1 – 8.
JIANG Dingsheng, FAN Xingke, LI Xinhua, et al. Study on horizontal and vertical regulation of soil anti-scourability in area with serious soil erosion on Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(2): 1 – 8. (in Chinese)

27 MAMO M, BUBENZER G D. Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots I: laboratory study[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5):1167 – 1174.

28 NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J. A process based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1587 – 1593.

29 AFSHIN Ghahramani, YOSHIHARU Ishikawa, TAKASHI Gom, et al. Downslope soil detachment-transport on steep slopes via rain splash[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(15): 2471 – 2480.