

DOI: 10.20103/j.stxb.202501030019

陈浩, 王博, 王豆豆, 樊浩, 李占斌. 混播草地不同部位对陕北黄土坡面侵蚀过程的调控效应. 生态学报, 2025, 45(17): - .
Chen H, Wang B, Wang D D, Fan H, Li Z B. Regulation effects of the roots, stems, and leaves of mixed grassland on erosion processes of loess slope in northern Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

混播草地不同部位对陕北黄土坡面侵蚀过程的调控效应

陈浩^{1, 2}, 王博¹, 王豆豆¹, 樊浩¹, 李占斌^{2, *}

1 延安大学生命科学学院, 延安 716000

2 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048

摘要: 草被是调控坡面侵蚀的有效措施, 然而草种配置及其不同部位对坡面侵蚀过程的调控效应尚缺乏定量研究。采用人工模拟降雨试验, 系统研究了不同雨强下高羊茅、苜蓿混播及单播草地不同部位(叶、茎、根)对黄土坡面侵蚀过程、径流侵蚀动力及土壤侵蚀阻力的影响。结果表明: 混播草地的减流减沙效益高于同部位的单播草地, 且高羊茅的减流减沙效益高于同部位的苜蓿。各草被地上部分(叶与茎)减流的相对贡献均高于根系, 但其减沙的相对贡献则均呈现出根系高于地上部分的特征。草被主要通过地上部分削减坡面径流流速和增加坡面阻力来实现对径流侵蚀动力的调控。混播草地对坡面径流的减速增阻效益高于同部位的单播草地, 且高羊茅的减速增阻效益高于同部位的苜蓿。同时, 草被主要通过根系生长活动改善表土性质进而增强土壤侵蚀阻力。不同的根系类型导致了土壤侵蚀阻力的差异, 须根系高羊茅增强土壤侵蚀阻力的作用优于直根系苜蓿, 而混播草地较大的根长密度及稠密的细根结构显著改善了表土理化性质, 从而表现出更佳的土壤抗侵蚀能力。本研究揭示了草被通过地上部分和根系实现对坡面侵蚀动力-阻力的同步双调控效应。草被垂直结构越完整, 坡面侵蚀的调控效应越显著, 且以混播草地对黄土坡面侵蚀的调控效果最佳。上述结果可深化草被覆盖调控坡面侵蚀过程研究, 并可为陕北黄土区草被恢复管理提供重要的科技支撑。

关键词: 土壤侵蚀过程; 植被垂直结构; 土壤可蚀性; 土壤临界剪切力; 水动力学参数; 黄土坡面

Regulation effects of the roots, stems, and leaves of mixed grassland on erosion processes of loess slope in northern Shaanxi Province

CHEN Hao^{1, 2}, WANG Bo¹, WANG Doudou¹, FAN Hao¹, LI Zhanbin^{2, *}

1 College of Life Science, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China

2 Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract: Grassland vegetation was an effective measure to control slope erosion. However, information regarding how the erosion processes and control efficiency differ as functions of grass species combinations and components was lacking. In this study, a series of artificial rainfall events (60, 90, and 120mm/h) were conducted on experimental plots (2 m×0.5 m) with a slope of 15° and treated with three different grass species combinations (*Festuca elata* (*F. elata*), *Medicago sativa* (*M. sativa*), and *Festuca elata*+*Medicago sativa* (*F. elata*+*M. sativa*)), with measurements of the runoff generation, sediment yield, and runoff velocity. A bare slope plot (BS) served as a control. Three erosion control scenarios were evaluated: intact grass, stems+roots, and root only. These results showed that the mixed grassland (*F. elata*+*M. sativa*) demonstrated superior runoff and sediment reduction across all rainfall intensities, outperforming both monocultures, with *F.*

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107359); 中国博士后科学基金项目(2022MD713800); 延安大学资政育人调研项目(YDZZ2024-01); 延安大学科研计划资助项目(YDBK2019-63)

收稿日期: 2025-01-03; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanbinli@126.com

elata showing greater efficacy than *M. sativa* under equivalent treatments. The above-ground components (stems/leaves) primarily reduced runoff volume, while roots dominated sediment yield reduction. Grassland vegetation regulated erosion dynamics mainly by its above-ground parts reducing flow velocity and increasing slope resistance. The mixed grassland (*F. elata*+*M. sativa*) showed the greatest benefits in reducing flow velocity and increasing slope resistance among the three grass species combinations across treatments, with *F. elata* outperforming *M. sativa* under equivalent conditions. In addition, grassland vegetation enhanced soil erosion resistance mainly through its root growth activities improving soil properties in the topsoil layer. There was a significant difference in soil erosion resistance enhancement efficiency among grasses with different root systems. The ability of *F. elata* with fibrous root systems to strengthen soil erosion resistance was better than that of *M. sativa* with taproot systems. However, the mixed grassland (*F. elata*+*M. sativa*) performed the best in enhancing soil erosion resistance due to the obvious improvement of topsoil properties by its dense and fine roots. This study revealed that grassland vegetation could control slope erosion processes through the joint action of above-ground parts and roots to regulate erosion dynamics and soil erosion resistance, simultaneously. The more complete the vertical structure of grassland vegetation, the more significant the slope erosion reduction efficiency. The mixed grassland had the optimal effects on controlling soil erosion of loess slopes. These results could deepen the study on the regulation of slope erosion processes in grasslands and provide an important technological support for grassland restoration and management in the loess region of northern Shaanxi province.

Key Words: soil erosion processes; vegetation vertical structure; soil erodibility; soil critical shear stress; hydrodynamic parameters; loess slope

土壤侵蚀是黄土高原的主要生态环境问题。坡面侵蚀是黄土高原地区分布最为广泛的侵蚀形式,也是该区严重侵蚀产沙的重要根源,其发生发展过程研究是认识该区土壤侵蚀动力机制和开展土壤侵蚀防治的重要基础。由于草本植物具有拦截降雨、削弱降雨对地表土壤的打击能力、影响地表径流水动力学特性、改善土壤理化及力学性质等多方面的作用^[1-2],同时,相较于木本植物,草本植物在相同条件下具有更高的物种丰富度及更短的生命周期^[3],其在植被演替及生态修复中作为先锋物种可快速覆盖地表,抑制土壤侵蚀并促进顶级群落恢复,因此,草被调控坡面侵蚀过程研究一直受到学者们的重点关注^[4-5]。

草被对坡面侵蚀过程的调控是其地上部分(茎和叶)和地下根系共同作用的结果。从侵蚀动力学机制看,草被地上部分主要影响侵蚀动力(降雨径流动力特征),而地下部分根系主要影响侵蚀阻力(土壤抗侵蚀性能)。一般认为,草被地上部分削减侵蚀动力主要体现在截留降雨、削减雨滴动能、增加表面粗糙度和减缓径流流速等方面^[5],而草被地下根系强化侵蚀阻力主要源于根系的生物化学作用驱动了土壤理化及力学性质的变化,以及根系的物理绕缠作用^[6-7]。可见,草被通过冠层叶、茎到地下根系等不同部位的直接、间接作用同步调控侵蚀动力和侵蚀阻力实现阻控坡面侵蚀过程。深入研究草被不同部位对坡面侵蚀过程的调控效应是揭示草被防蚀机理及实施相应防治措施的重要基础。以往学者针对草被不同部位对坡面侵蚀的影响开展了大量研究,并采用分层剥离的办法,量化了草被不同部位的减蚀作用^[8-9]。不同草被类型由于其结构和形态特征存在显著差异,从而导致其对侵蚀的调控效应明显不同。Zhao 等^[10]通过对沙打旺调控坡面侵蚀的研究认为根系较冠层的减沙效益更为显著。Zhang 等^[11]在野外降雨试验中发现草被冠层与根系在控制侵蚀产沙过程中的作用几乎相当。而 Zhang 等^[12]利用室内模拟降雨试验指出 2 种草被(香根草与糖蜜草)地上冠层对减小坡面侵蚀的影响贡献大于植物根系。已有研究主要侧重于对比分析单一草种及其地上、地下部分在坡面减蚀效益中的作用,而很少针对草种配置系统分析混播草地不同部位差异对坡面侵蚀动力学过程的调控。

草被在干旱半干旱陕北黄土区水土流失防治中发挥着积极作用。在退耕驱动下,陕北黄土高原大面积的坡地已被自然恢复的混生草本植物所覆盖,这不但有效削减了坡地侵蚀动力,而且大大增强了土壤侵蚀阻力,

其结果必然引起坡地侵蚀发生显著变化,进而影响黄河流域泥沙的变化。与此同时,禾本科与豆科牧草混播是一种常见且有效的人工草地种植策略^[13]。开展混播草地植被不同部位对陕北黄土坡面侵蚀过程调控的研究,不仅可为深入揭示草地植被恢复调控土壤侵蚀过程的影响机制提供理论依据,并可为科学评价草地刈割管护措施控制土壤侵蚀的作用效应奠定实验基础。基于此,本研究采用人工模拟降雨试验,选取适宜黄土高原地区生长的禾本科牧草(高羊茅)与豆科牧草(苜蓿)为研究草种,依次去除叶、茎形成了不同部位处理(全株、除叶、根系)的草被小区,系统研究不同雨强下单播高羊茅、单播苜蓿及混播高羊茅+苜蓿 3 种草被及其不同部位(叶、茎、根)对陕北黄土坡面侵蚀过程、径流侵蚀动力及土壤侵蚀阻力的影响,旨在为草地阻控侵蚀过程研究及黄土高原地区人工草地建植管护提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验条件

人工模拟降雨试验于 2023 年 8—9 月在延安大学水土保持生态试验基地人工模拟降雨实验室开展。该实验室为密闭环境,配备有下喷式模拟降雨系统(MSR-S20-W1100 型)、激光雨滴谱仪、移动式变坡土槽等设备。该降雨系统通过智能终端控制大中小三种规格喷头开关组合状态及其水压,从而实现不同雨滴直径(0.3—6 mm)及雨强(18—200 mm/h)的自然降雨模拟,其调控精度为 ± 5 mm/h。模拟降雨高度为 5 m,有效降雨面积为 20 m²(长 \times 宽=4 m \times 5 m)。正式试验前均会率定雨强大小及降雨均匀度,使其达到设计要求^[14]。

1.2 试验设计及过程

1.2.1 试验小区建设

试验土壤取自陕北黄土丘陵沟壑区(陕西省延安市安塞区)梁峁坡母质层土壤,土壤类型为黄绵土。将野外采回的土壤过 2 mm 的土壤筛,除去杂质后,获得试验用土。试验小区为可调坡度的移动式钢制土槽,其规格为 2 m \times 0.5 m \times 0.4 m(长 \times 宽 \times 深),土槽底部均匀开孔。土槽按设计容重 1.2 g/cm³分层装填过筛土,土层间用木板刮毛整平,装填总深度为 35 cm,并在装填中将其四周边壁处土壤尽量压实。草被小区建植选择适宜陕北黄土区生长的水土保持牧草品种高羊茅(*Festuca elata*(*F. elata*))和苜蓿(*Medicago sativa*(*M. sativa*))为研究草种,并按照单播高羊茅、单播苜蓿、混播高羊茅+苜蓿(混播比例 1:1)的种植模式于 2023 年 4 月底完成试验小区布设(图 1)。根据课题组前期研究,确定草被小区播种密度为 72 株/m²。各试验小区均设 2 个重复,共计 8 个小区。在整个生长周期内对各小区进行浇水施肥、修剪及铲除结皮等精细化管护,并最大程度减小重复处理小区间的差异,正式试验是在草被生长 3 个月长势稳定后开始。

1.2.2 试验过程

各草被不同部位处理(全株、除叶、根系)小区是通过依次去除草被叶、茎后得到。根据黄土高原地形特征及侵蚀暴雨标准^[15],试验设计坡度为 15°,雨强分别为 60 mm/h、90 mm/h 和 120 mm/h,每个雨强一次重复,因此,裸地小区试验为 6 场次(3 个雨强 \times 2 个重复),草被小区试验为 54 场(3 种草被 \times 3 个处理 \times 3 个雨强 \times 2 个重复),总共 60 场降雨试验。首先进行全株草被小区模拟降雨,测定其叶、茎、根作用下的侵蚀过程。根据前期的试验结果^[13],草被小区每次的侵蚀产沙量较少,仅发生面蚀,在每场降雨试验结束后,会根据该次降雨侵蚀量将同等质量流失的土壤均匀铺撒在土槽表面,然后将土槽放置 3 天后再进行下一场降雨试验。在整个试验期间,草被小区由于植物的保护,加之试验后对其土壤表面的修复处理,故小区土表变化甚微。待其结束后,用剪刀将植株的叶片剪除,作为除叶草被小区进行模拟降雨,测定草被根、茎作用下的侵蚀过程,各场次试验间的安排及处理如前所述。最后,贴地剪掉植物茎秆,作为根系草被小区进行模拟降雨,测定草被仅含根系作用下的侵蚀过程,其各场次试验处理同前。裸地小区试验安排重复上述处理。由于整个降雨试验时间安排较为集中,且草被处于成熟稳定期,故试验期内草被生长的影响可忽略不计。模拟降雨开始前对试验小区实施预降雨(雨强 30 mm/h)直至产流为止。降雨开始后用秒表计时,产流后每隔 2 min 用量筒收集一次径流全样,10 min 后每隔 5 min 采集一次径流全样,直到产流 35 min 后结束试验,接着读取径流体积,撇掉上层清

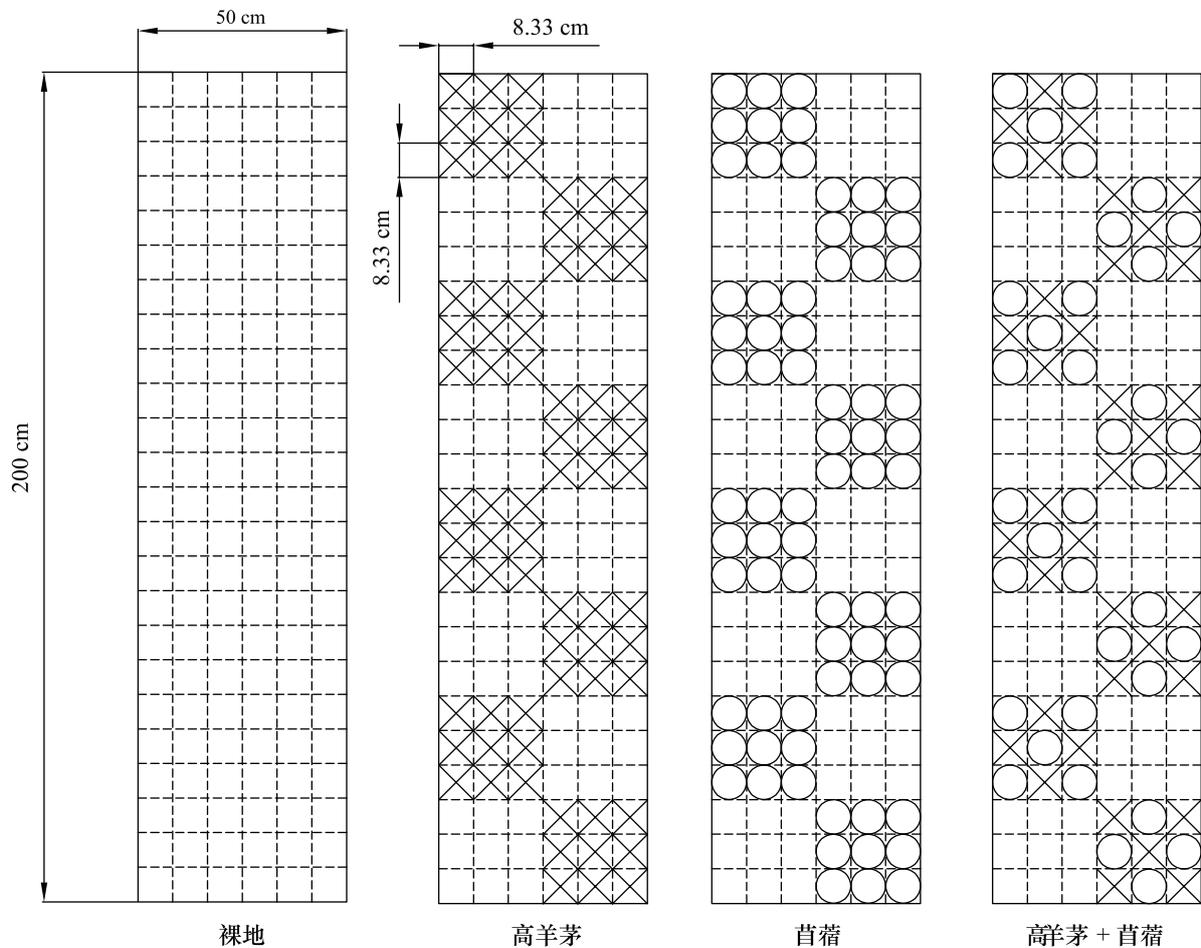


图 1 试验小区布局示意图

Fig.1 Schematic diagram of the layout in the experimental plots

液烘干后计算得到相应的侵蚀率及径流率。降雨试验过程中采用示踪剂 (KMnO_4) 测定小区坡面上两个固定断面 (0—1 m 和 1—2 m) 左中右不同位置上的表面流速, 同时监测水温, 根据水流雷诺数及其流态, 乘以修正系数 0.67^[16], 得到水流断面平均流速。

1.2.3 试验测定

草被地上部分植被参数测定: 冠层盖度是通过数码相机在草被小区正上方垂直拍照后, 利用 Image J 软件, 结合对分类结果的目视判读计算获得。植物平均株高与地径是利用钢尺量测草被小区上、中、下 3 个位置上具有代表性的植物相应的株高与地径后获得。地上生物量干重是通过收集草被小区植物冠层烘干后得到。

草被地下根系参数测定: 在试验结束后, 利用长 10 cm、宽 10 cm、深 10 cm 的根系取样器在草被小区上中下不同位置各采集 3 个根土样品, 接着将样品中的根系全部洗出并编号, 借助根系扫描分析系统 (Win RHIZO) 计算获得相应的根长密度、根表面积密度及根体积密度^[17]。

土壤理化性质测定: 同样在试验小区上中下不同位置采集土壤样品, 并根据相应的经典测定方法开展分析^[18-19], 其中, 土壤容重及总孔隙度采用的方法为环刀法; 土壤团聚体平均重量直径采用的方法为 Yoder 法 (干筛+湿筛法); 土壤粘结力采用的方法为便携式三头抗剪仪法; 土壤饱和导水率采用的方法为定水头环刀法; 土壤有机质采用的方法为重铬酸钾法; 土壤 pH 采用土壤 pH 计法。

1.3 试验指标计算及分析

1.3.1 水动力学参数

本研究中涉及到的坡面径流水动力学参数包括水流断面平均流速 (V_{avg})、雷诺数 (Re)、弗劳德数 (Fr)、

Darcy-Weisbach 阻力系数(f)和 水流剪切力(τ)等,其计算公式如下^[10, 14]:

$$V_{avg} = \alpha V_s \quad (1)$$

$$h = q/V_{avg} \quad (2)$$

$$Re = V_{avg} h/u \quad (3)$$

$$u = 0.01775/(1+0.0337T+0.000221 T^2) \quad (4)$$

$$Fr = V_{avg}/\sqrt{gh} \quad (5)$$

$$f = 8gRJ/V_{avg}^2 \quad (6)$$

$$\tau = \gamma RJ \quad (7)$$

式中, V_s 为水流表面流速(cm/s); α 为修正系数(当水流为层流时, $\alpha=0.67$); h 为水深(cm); q 为单宽流量(cm^2/s); u 为水流运动黏滞系数(m^2/s); T 为水温($^{\circ}\text{C}$); g 为重力加速度(m/s^2),取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; R 为水力半径(m); J 为水力坡度(m/m),其值为坡度的正弦值; γ 为水的容重(N/m^3),取 $9800 \text{ N}/\text{m}^3$ 。

1.3.2 草被不同部位阻控侵蚀的效益及相对贡献

3 种草被(i =高羊茅、苜蓿、高羊茅+苜蓿)不同部位处理(j =全株、除叶、根系)下的坡面减沙效益计算公式如下:

$$RE_{ij} = (\text{SYR}_b - \text{SYR}_{ij})/\text{SYR}_b \times 100\% \quad (8)$$

式中, RE_{ij} 是草被不同部位处理下的减沙效益(%); SYR_b 是裸地的侵蚀率($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$); SYR_{ij} 是草被不同部位处理下的侵蚀率($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$)。同理,可计算得到草被不同部位处理下的减流效益、减速效益及增阻效益等。

草被不同部位减沙效益的相对贡献计算公式如下:

$$RC_{\text{叶}} = (RE_{i(\text{全株})} - RE_{i(\text{除叶})})/RE_{i(\text{全株})} \times 100\% \quad (9)$$

$$RC_{\text{茎}} = (RE_{i(\text{除叶})} - RE_{i(\text{根系})})/RE_{i(\text{全株})} \times 100\% \quad (10)$$

$$RC_{\text{根系}} = RE_{i(\text{根系})}/RE_{i(\text{全株})} \times 100\% \quad (11)$$

式中, $RC_{\text{叶}}$ 、 $RC_{\text{茎}}$ 、 $RC_{\text{根系}}$ 分别为草被叶、茎、根系减沙效益的相对贡献(%); $RE_{i(\text{全株})}$ 、 $RE_{i(\text{除叶})}$ 、 $RE_{i(\text{根系})}$ 分别为全株草被、除叶草被、根系草被的减沙效益(%). 同理,可计算得到草被不同部位减流效益的相对贡献。

1.3.3 数据分析

在 SPSS 26.0 软件中进行各试验小区间单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)检验($P=0.05$)。制图通过 Origin 2021 软件完成。

2 结果与分析

2.1 草被不同部位对坡面侵蚀过程的影响

2.1.1 草被不同部位对坡面产流过程的影响

图 2 显示了不同雨强下裸地及各部位处理草被小区径流率随降雨历时的变化。总体上,各试验小区径流率呈现出前期快速递增、而后缓慢增加并趋于稳定的特点。相同雨强下各试验小区的平均径流率差异显著($P<0.05$) (表 1),呈现出裸地小区>根系小区>除叶小区>全株小区的规律,其不同雨强下的平均径流率均值分别为 $0.98 \text{ mm}/\text{min}$ 、 $0.92 \text{ mm}/\text{min}$ 、 $0.84 \text{ mm}/\text{min}$ 和 $0.70 \text{ mm}/\text{min}$,因此,草被的根系小区、除叶小区及全株小区相较于裸地小区的平均减流效益分别为 6.12% 、 14.28% 和 28.57% ,则草被的叶、茎、根系平均减流效益分别为 14.29% 、 8.16% 、 6.12% ,表明草被地上部分(叶与茎)的减流效益高于植物根系。此外,相同部位各草被间平均径流率呈现苜蓿小区>高羊茅小区>高羊茅+苜蓿小区的特征,其平均径流率均值分别为 $0.85 \text{ mm}/\text{min}$ 、 $0.83 \text{ mm}/\text{min}$ 和 $0.79 \text{ mm}/\text{min}$,相应的平均减流效益分别为 13.26% 、 15.31% 和 19.39% ,表明混播草地的减流效益高于同部位的单播草地,且高羊茅的减流效益高于同部位的苜蓿。

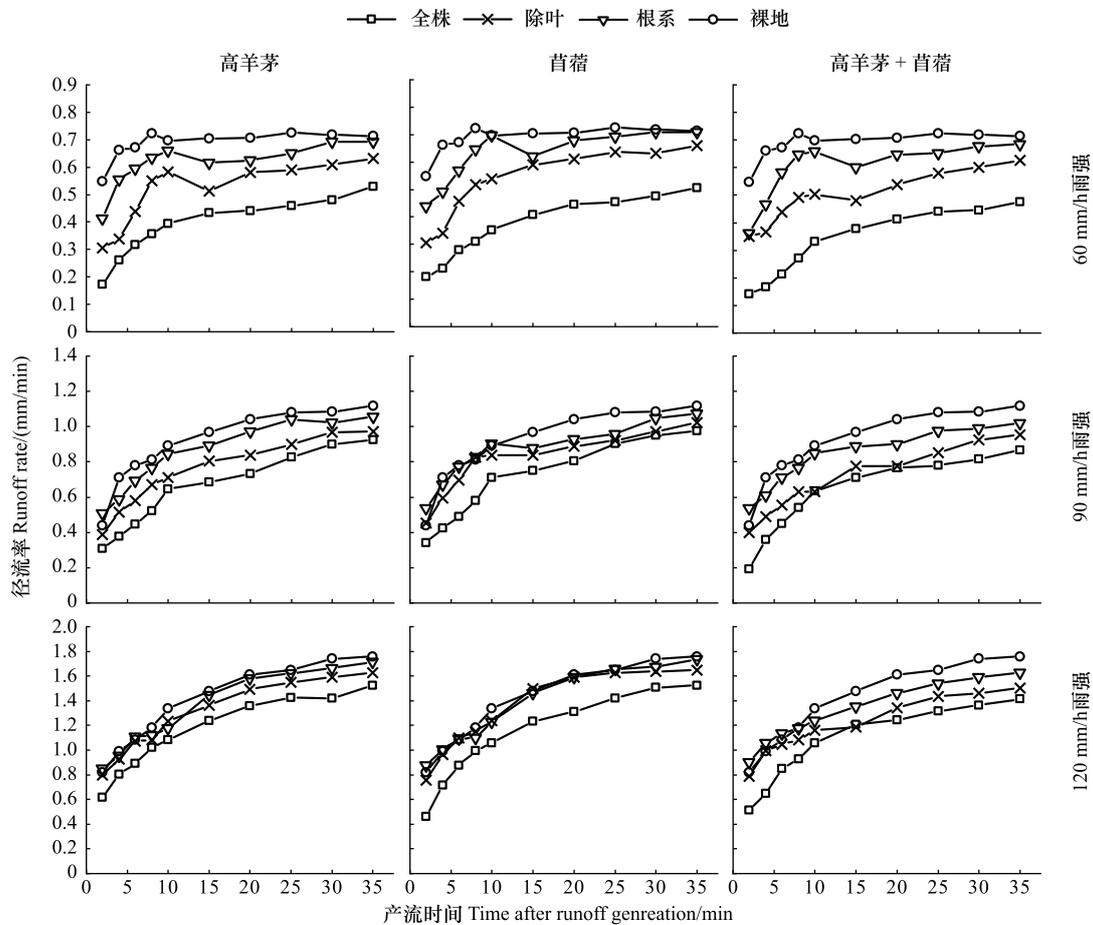


图2 不同雨强下裸地及各部位处理草被小区径流率随降雨历时的变化

Fig.2 Runoff rate process on bare slope and the grassland vegetation plots with different parts under different rainfall intensities

表1 不同雨强下裸地及各部位处理草被小区的平均径流率与平均侵蚀率

Table 1 Mean runoff rate and mean sediment yield rate on bare slope and the grassland vegetation plots with different parts under different rainfall intensities

草地植被 Grassland vegetation	雨强 Rainfall intensity/ (mm/h)	平均径流率 Mean runoff rate/(mm/min)				平均侵蚀率 Mean sediment yield rate/(g m ⁻² min ⁻¹)			
		裸地	根系	除叶	全株	裸地	根系	除叶	全株
高羊茅 <i>F. elata</i>	60	0.69±0.05aA	0.61±0.08aA	0.51±0.11bA	0.38±0.11cA	2.46±1.23aA	1.33±0.51bA	1.11±0.41bA	0.83±0.49bA
	90	0.89±0.21aB	0.84±0.2aB	0.73±0.2abB	0.64±0.22bB	8.22±1.75aB	4.14±0.83bB	3.71±0.93bB	3.14±0.85bB
	120	1.36±0.33aC	1.32±0.32aC	1.27±0.30aC	1.14±0.30aC	19.11±4.16aC	9.38±2.70bC	8.01±2.64bcC	7.28±2.48cC
苜蓿 <i>M. sativa</i>	60	0.69±0.05aA	0.63±0.10aA	0.53±0.12bA	0.36±0.11cA	2.46±1.23aA	1.43±0.56bA	1.18±0.468bA	1.03±0.58bA
	90	0.89±0.21aB	0.86±0.17abB	0.80±0.18abB	0.69±0.23bB	8.22±1.75aB	4.49±1.10bB	4.05±0.91bB	3.75±0.716bB
	120	1.36±0.33aC	1.34±0.32aC	1.32±0.32aC	1.11±0.35aC	19.11±4.16aC	10.03±2.91bC	8.46±2.82bC	7.96±2.99bC
高羊茅+苜蓿 <i>F. elata+</i> <i>M. sativa</i>	60	0.69±0.05aA	0.60±0.10bA	0.50±0.09cA	0.33±0.12dA	2.46±1.23aA	0.97±0.31bA	0.90±0.39bA	0.68±0.23bA
	90	0.89±0.21aB	0.82±0.16abB	0.70±0.19bcB	0.61±0.22cB	8.22±1.75aB	4.21±1.08bB	3.38±0.89bcB	2.92±0.64cB
	120	1.36±0.33aC	1.31±0.25abC	1.20±0.23abC	1.05±0.31bC	19.11±4.16aC	8.58±3.03bC	6.91±2.44bcC	6.81±2.08cC

同一行不同小写字母表示相同雨强下同一草地植被不同部位处理小区之间差异显著,同一列不同大写字母表示同一草地植被相同部位处理小区不同雨强之间差异显著($P < 0.05$)

2.1.2 草被不同部位对坡面产沙过程的影响

图3显示了不同雨强下裸地及各部位处理草被小区侵蚀率随降雨历时的变化。在60 mm/h和90 mm/h

雨强下,各试验小区侵蚀率随时间的变化呈现出先快速增加、达到峰值后(约 6—8 min)迅速下降并趋于平缓的变化特征;但在 120 mm/h 雨强下,各试验小区侵蚀率在产流初期即达到峰值,而后缓慢降低趋于稳定。由表 1 可知,同一雨强下各试验小区的平均侵蚀率呈现出裸地小区>根系小区>除叶小区>全株小区的特征,其不同雨强下的平均侵蚀率均值分别为 $9.93 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 、 $4.95 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 、 $4.19 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 和 $3.82 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 。所以,草被的根系小区、除叶小区及全株小区相较于裸地小区的平均减沙效益分别为 50.12%、57.80% 和 61.50%,则草被的叶、茎、根系平均减沙效益分别为 3.70%、7.68% 和 50.12%,说明草被根系的减沙效益显著高于地上部分(叶与茎)。另外,同部位各草被小区间平均侵蚀率呈现的规律为苜蓿小区>高羊茅小区>高羊茅+苜蓿小区,其平均侵蚀率均值分别为 $4.71 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 、 $4.33 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 和 $3.93 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$,相应的平均减沙效益分别为 52.57%、56.43% 和 60.42%,可见混播草地的减沙效益高于同部位的单播草地,且高羊茅的减沙效益高于同部位的苜蓿。

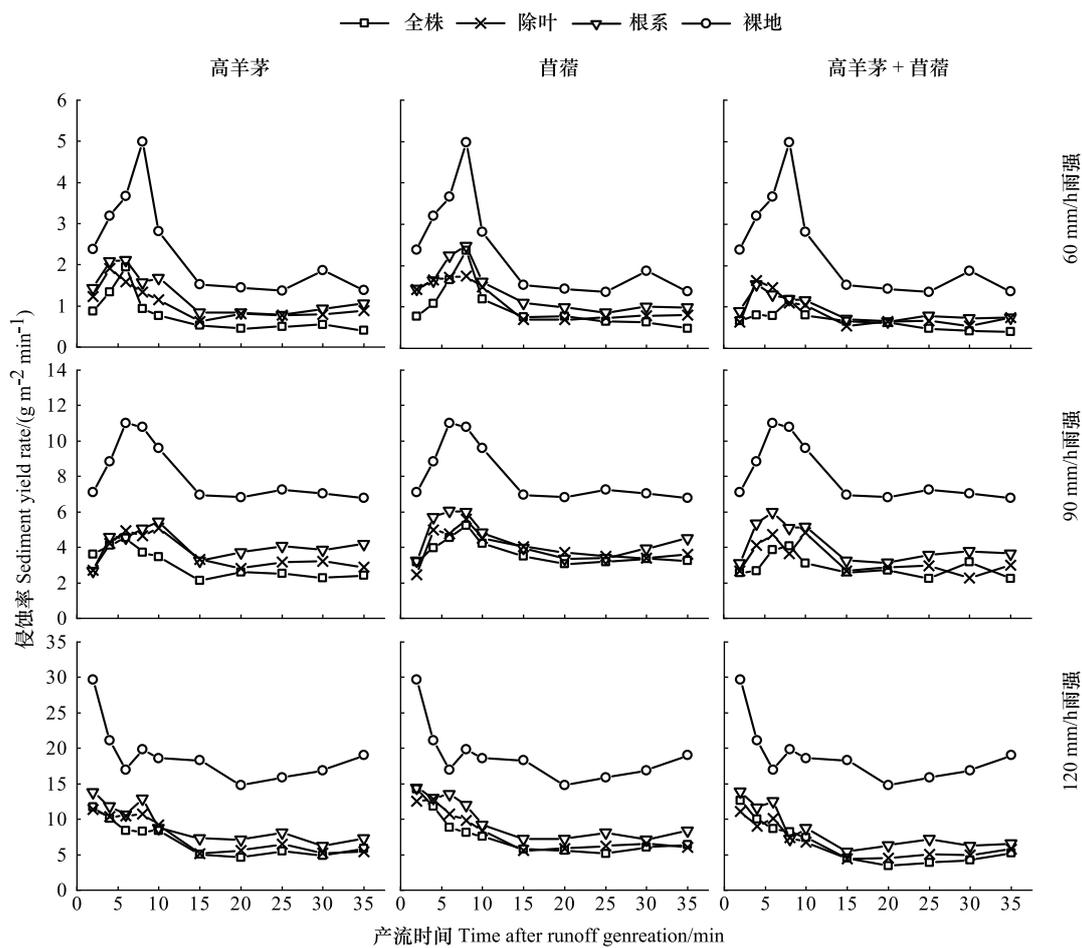


图 3 不同雨强下裸地及各部位处理草被小区侵蚀率随降雨历时的变化

Fig.3 Sediment yield rate process on bare slope and the grassland vegetation plots with different parts under different rainfall intensities

2.1.3 草被不同部位阻控坡面侵蚀的相对贡献

图 4 显示了不同雨强下草被各部位减流减沙效益的相对贡献。3 种草被地上部分(叶与茎)减流的相对贡献均高于地下根系,且草被地上部分减流的相对贡献随着雨强的增大呈增加趋势。不同雨强下,高羊茅、苜蓿及高羊茅+苜蓿地上部分减流的平均相对贡献分别为 77.41%、84.74% 和 76.90%,与之相应的地下根系减流的平均相对贡献分别为 22.59%、15.26% 和 23.10%。不同于减流效益,3 种草被根系减沙的相对贡献均高于地上部分,且随着雨强的增大,草被根系减沙的相对贡献有所增加,同时混播草地根系减沙的平均相对贡献高于单播草地根系。不同雨强下,高羊茅、苜蓿及高羊茅+苜蓿地下根系减沙的平均相对贡献分别为 77.25%、

78.84%和 81.68%,与之相应的地上部分减沙平均相对贡献分别为 22.75%、21.16%和 18.32%。对于草被叶与茎减流效益的相对贡献而言,3 种草被叶的相对贡献均高于茎;而对于减沙效益的相对贡献而言,苜蓿与高羊茅+苜蓿的茎相对贡献较大,而高羊茅的叶发挥的作用略大于茎。

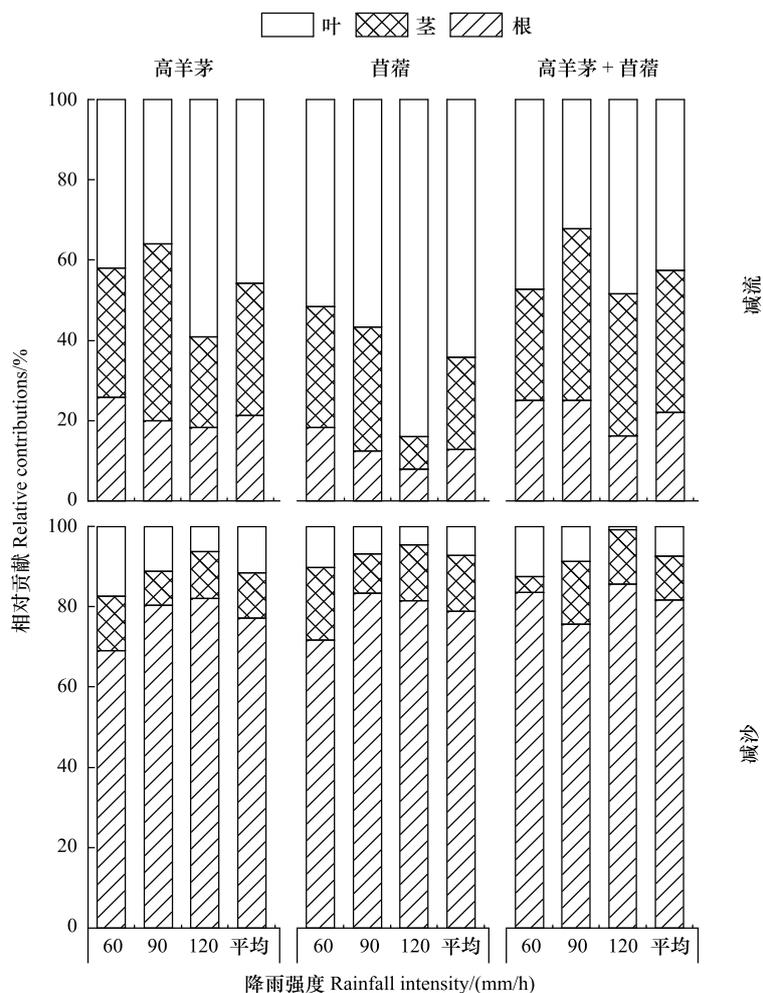


图 4 不同雨强下草被叶、茎、根阻控坡面侵蚀的相对贡献

Fig.4 Relative contribution of the roots, stems, and leaves of grassland vegetation in slope erosion reduction at different rainfall intensities

2.2 草被不同部位对坡面径流水动力学参数的影响

表 2 显示了不同雨强下裸地及各部位处理草被小区坡面径流水动力学特征。各试验小区在同一雨强下的坡面径流流速 (V_{avg}) 呈现出 $V_{\text{avg裸地}} > V_{\text{avg根系}} > V_{\text{avg除叶}} > V_{\text{avg全株}}$ 的特征,其在不同雨强下的均值分别为 9.33 cm/s、8.55 cm/s、6.68 cm/s 和 5.38 cm/s。因此,相较于裸地小区,草被的根系小区、除叶小区及全株小区平均减速效益分别为 8.4%、28.4%和 42.3%,则草被的叶、茎、根系平均减速效益分别为 13.9%、20.1%、8.4%,可见草被地上部分叶与茎的减速效益明显大于草被根系。另外,同部位各草被小区间的径流流速呈现出的规律为 $V_{\text{avg苜蓿}} > V_{\text{avg高羊茅}} > V_{\text{avg高羊茅+苜蓿}}$,其均值分别为 7.06 cm/s、6.91 cm/s 和 6.63cm/s,相应的平均减速效益分别为 24.3%、26.0%和 29.0%。各试验小区的径流流速随着雨强的增大呈现显著增加趋势。

Darcy-Weisbach 阻力系数 (f) 适用于描述坡面径流的阻力特征。由表 2 可以看出,同一雨强下,各试验小区坡面 f 呈现的规律为 $f_{\text{全株}} > f_{\text{除叶}} > f_{\text{根系}} > f_{\text{裸地}}$,其在不同雨强下的坡面 f 均值分别为 2.91、2.06、1.09 和 0.75。所以,相较于裸地小区,草被的根系小区、除叶小区及全株小区平均增阻效益分别为 45.3%、174.2%和 287.6%,故草被的叶、茎、根系平均增阻效益分别为 113.3%、128.9%、45.3%,说明草被地上部分叶与茎的增阻效益远

大于草被根系。同样,同部位各草被小区间的坡面 f 呈现出的规律为 $f_{\text{高羊茅+苜蓿}} > f_{\text{高羊茅}} > f_{\text{苜蓿}}$, 其均值分别为 2.28、1.96 和 1.82, 相应的平均增阻效益分别为 204.0%、160.9% 和 142.2%。另外, 各试验小区坡面 f 随着雨强的增大呈现减小趋势。

表 2 不同雨强下裸地及各部位处理草被小区坡面径流水动力学参数特征

Table 2 Characteristics of hydrodynamic parameters of overland flow on bare slope and the grassland vegetation plots with different parts under different rainfall intensities

雨强 Rainfall intensity/ (mm/h)	处理 Treatments	流速 Flow velocity/ (cm/s)	达西阻力系数 Darcy-Weisbach resistance coefficient	雷诺数 Reynolds number	弗劳德数 The Froude number	
60	裸地	8.21±0.31aA	0.82	24.58	0.05	
	高羊茅 _{全株}	4.40±0.55cA	3.01	14.53	0.03	
	高羊茅 _{除叶}	5.40±1.00bA	2.40	14.85	0.03	
	高羊茅 _{根系}	7.41±1.45aA	1.19	16.44	0.05	
	苜蓿 _{全株}	4.50±0.29dA	2.84	14.43	0.03	
	苜蓿 _{除叶}	5.98±1.36cA	1.98	15.72	0.04	
	苜蓿 _{根系}	7.25±1.13bA	1.29	16.44	0.04	
	高羊茅+苜蓿 _{全株}	3.92±0.44cA	3.89	12.46	0.03	
	高羊茅+苜蓿 _{除叶}	5.36±0.90bA	2.46	14.21	0.03	
	高羊茅+苜蓿 _{根系}	7.56±1.74aA	1.27	16.10	0.05	
	90	裸地	9.39±1.31aA	0.73	32.16	0.06
		高羊茅 _{全株}	5.30±0.68cB	2.80	22.70	0.03
高羊茅 _{除叶}		6.41±0.93bB	2.05	22.36	0.03	
高羊茅 _{根系}		8.48±1.50aA	1.02	24.17	0.05	
苜蓿 _{全株}		5.69±0.83cB	2.52	23.33	0.03	
苜蓿 _{除叶}		6.92±1.09bA	1.89	23.66	0.04	
苜蓿 _{根系}		8.56±0.88aB	1.01	24.33	0.05	
高羊茅+苜蓿 _{全株}		4.89±0.59dB	3.30	21.25	0.03	
高羊茅+苜蓿 _{除叶}		6.07±0.90cA	2.30	21.47	0.03	
高羊茅+苜蓿 _{根系}		8.14±1.08bA	1.07	23.18	0.05	
120		裸地	10.40±2.02aB	0.70	49.22	0.06
		高羊茅 _{全株}	6.78±0.90cC	2.41	36.93	0.03
	高羊茅 _{除叶}	8.03±0.94cC	1.72	37.88	0.04	
	高羊茅 _{根系}	10.04±0.90bB	0.99	38.44	0.05	
	苜蓿 _{全株}	6.94±1.13cC	2.29	37.60	0.03	
	苜蓿 _{除叶}	8.41±0.46cB	1.58	37.73	0.04	
	苜蓿 _{根系}	9.85±0.74bC	0.93	38.05	0.05	
	高羊茅+苜蓿 _{全株}	6.01±0.88dC	3.11	35.81	0.03	
	高羊茅+苜蓿 _{除叶}	8.03±0.95cB	2.12	34.09	0.04	
	高羊茅+苜蓿 _{根系}	9.67±0.69bB	1.02	36.13	0.05	

同一列不同小写字母表示相同雨强下同一草被不同部位处理小区之间差异显著 ($P < 0.05$); 同一列不同大写字母表示同一草被相同部位处理小区不同雨强之间差异显著 ($P < 0.05$)

雷诺数 (Re) 和弗劳德数 (Fr) 是表征水流紊动与急缓程度的流态参数。由表 2 可知, 同一雨强下, 各试验小区径流 Re 基本上呈现 $Re_{\text{裸地}} > Re_{\text{根系}} > Re_{\text{除叶}} > Re_{\text{全株}}$ 的特征, 其不同雨强下的径流 Re 均值分别为 35.32、25.92、24.66 和 24.34, 相较于裸地小区, 草被的根系小区、除叶小区和全株小区的径流 Re 平均减小效益分别为 26.6%、30.2% 和 31.1%, 则草被的叶、茎、根系减小径流 Re 平均效益分别为 0.9%、3.6%、26.6%。相同部位各草被小区间径流 Re 基本呈现的规律为 $Re_{\text{苜蓿}} > Re_{\text{高羊茅}} > Re_{\text{高羊茅+苜蓿}}$, 其均值分别为 25.7、25.4、23.9, 相应的减小径流 Re 平均效益分别为 27.3%、28.2%、32.5%。各试验小区径流 Re 随着雨强的增大均呈现出增加趋势。

不同雨强下各试验小区径流 Re 介于 12.46—49.22 之间 ($Re < 500$), 这说明各试验小区的径流均为层流。与此同时, 不同雨强下各试验小区的径流 Fr 介于 0.03—0.06 之间 ($Fr < 1$), 这说明试验小区径流均为缓流。不同雨强下, 裸地的径流 Fr 大于草被小区, 在各部位处理草被小区中, 草被根系小区径流 Fr 较大, 而除叶小区与全株小区的径流 Fr 差异不明显。裸地小区、根系小区、除叶小区和全株小区在不同雨强下的径流 Fr 均值分别为 0.060、0.050、0.033 和 0.030, 相比于裸地小区, 草被的根系小区、除叶小区和全株小区的径流 Fr 平均减小效益分别为 16.7%、45.0% 和 50.0%, 则草被的叶、茎、根系减小径流 Fr 平均效益分别为 5.0%、28.3%、16.7%。相同部位各草被间径流 Fr 无明显差异。此外, 各试验小区的径流 Fr 随着雨强的增大变化无差异。

2.3 草被不同部位对坡面土壤侵蚀阻力的影响

土壤可蚀性 K (s/m) 和土壤临界剪切力 τ_c (Pa) 是表征坡面土壤抵抗侵蚀的阻力特征。土壤可蚀性越大、土壤临界剪切力越小, 则坡面土壤越容易被侵蚀, 土壤侵蚀阻力越小; 反之, 土壤可蚀性越小、土壤临界剪切力越大, 则坡面土壤越不容易被侵蚀, 土壤侵蚀阻力越大^[20]。本研究将各草被不同部位处理小区侵蚀过程中产生的坡面侵蚀率与水流剪切力进行线性拟合得到表征坡面土壤侵蚀阻力的参数, 即土壤可蚀性(拟合直线的斜率)和土壤临界剪切力(拟合直线在横坐标 X 轴上的截距)(图 5)。表 3 显示了各草被不同部位处理小区的土壤可蚀性和土壤临界剪切力。土壤可蚀性 (K) 在各部位处理小区间呈现的特征为 $K_{\text{裸地}} > K_{\text{根系}} > K_{\text{除叶}} > K_{\text{全株}}$, 其均值分别为 18.81 s/m、9.22 s/m、6.35 s/m 和 5.12 s/m。相较于裸地小区, 草被的根系小区、除叶小区及全株小区的土壤可蚀性分别减小了 50.98%、66.24% 和 72.78%, 则草被的叶、茎、根系对土壤可蚀性分别减小了 6.54%、15.26%、50.98%。可见草被根系对降低土壤可蚀性的作用远大于地上部分叶与茎的作用。此外, 同部位各草被间土壤可蚀性呈现的特征为 $K_{\text{苜蓿}} > K_{\text{高羊茅}} > K_{\text{高羊茅+苜蓿}}$, 其均值分别为 8.58 s/m、6.42 s/m 和 5.69 s/m, 相应的土壤可蚀性分别减小了 54.39%、65.87% 和 69.75%。与土壤可蚀性不同, 土壤临界剪切力 (τ_c) 在草被各部位处理小区间呈现的特征为 $\tau_{c\text{除叶}} > \tau_{c\text{根系}} > \tau_{c\text{全株}} > \tau_{c\text{裸地}}$, 其均值分别为 0.32 Pa、0.29 Pa、0.28 Pa 和 0.10 Pa。与裸地小区相比, 草被的根系小区、除叶小区及全株小区的土壤临界剪切力分别增加了 190%、220% 和 180%, 可见草被根系在提高土壤临界剪切力上起主导作用。同部位各草被小区间的土壤临界剪切力呈现的特征为 $\tau_{c\text{高羊茅+苜蓿}} > \tau_{c\text{高羊茅}} > \tau_{c\text{苜蓿}}$, 其均值分别为 0.32 Pa、0.29 Pa 和 0.28 Pa, 相应的土壤临界剪切力分别增加了 220%、190% 和 180%。综上所述, 与裸地小区相比, 不同草被各部位处理小区的土壤可蚀性明显减小, 相应的土壤临界剪切力大幅增加, 这说明不同草被各部位处理小区的土壤侵蚀阻力得到显著增强, 其中混播草地增强土壤侵蚀阻力的效益高于单播草地, 且高羊茅对土壤侵蚀阻力的增强效益高于苜蓿。草被增强土壤侵蚀阻力的能力主要取决于植物根系的作用。

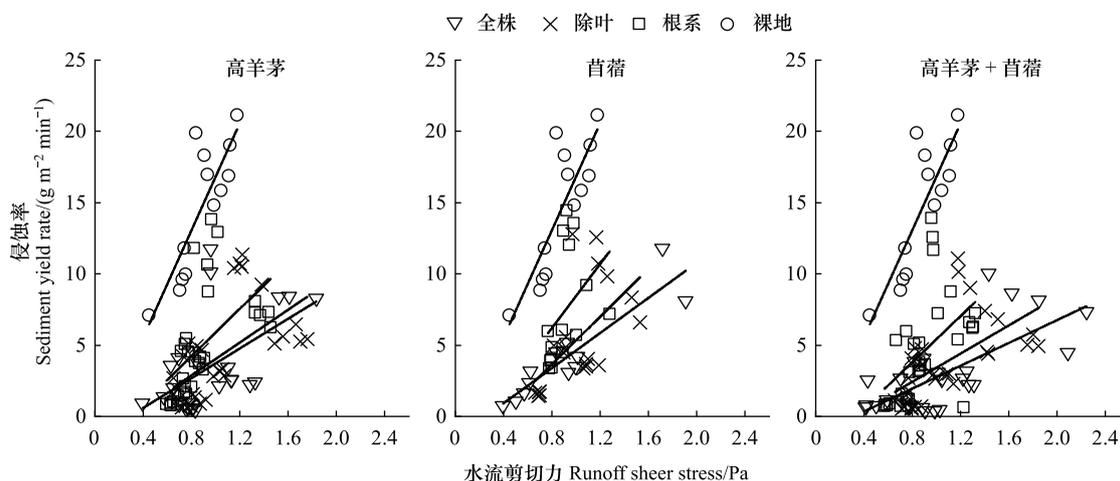


图 5 裸地及不同部位处理草被小区土壤侵蚀率与水流剪切力的关系

Fig.5 The relationships between sediment yield rate and shear stress on bare slope and the grassland vegetation plots with different parts

表 3 裸地及不同部位处理草被小区的土壤侵蚀率(SYR)与水流剪切力(τ)的回归方程

Table 3 Regression equation between sediment yield rate and shear stress on bare slope and the grassland vegetation plots with different parts

处理 Treatments	回归方程 Regression equation	$K/(s/m)$	$\tau_c/(Pa)$	R^2	P
裸地 Bare slope	SYR = 18.81 τ - 1.881	18.81	0.10	0.709	<0.01
高羊茅 _{全株} <i>F. elata</i> (IG)	SYR = 5.21 τ - 1.459	5.21	0.28	0.301	<0.01
高羊茅 _{除叶} <i>F. elata</i> (NL)	SYR = 5.76 τ - 1.728	5.76	0.30	0.327	<0.01
高羊茅 _{根系} <i>F. elata</i> (OR)	SYR = 8.29 τ - 2.404	8.29	0.29	0.305	<0.01
苜蓿 _{全株} <i>M. Sativa</i> (IG)	SYR = 6.15 τ - 1.476	6.15	0.24	0.835	<0.01
苜蓿 _{除叶} <i>M. Sativa</i> (NL)	SYR = 8.34 τ - 2.919	8.34	0.35	0.585	<0.01
苜蓿 _{根系} <i>M. Sativa</i> (OR)	SYR = 11.25 τ - 2.813	11.25	0.25	0.151	>0.05
高羊茅+苜蓿 _{全株} <i>F. elata</i> + <i>M. sativa</i> (IG)	SYR = 4.01 τ - 1.243	4.01	0.31	0.505	<0.01
高羊茅+苜蓿 _{除叶} <i>F. elata</i> + <i>M. sativa</i> (NL)	SYR = 4.95 τ - 1.535	4.95	0.31	0.352	<0.01
高羊茅+苜蓿 _{根系} <i>F. elata</i> + <i>M. sativa</i> (OR)	SYR = 8.11 τ - 2.676	8.11	0.33	0.260	<0.01

K :土壤可蚀性 soil erodibility; τ_c :土壤临界剪切力 soil critical shear stress; IG:全株 Intact grass; NL:除叶 only grass stems and roots; OR:根系 only roots

事实上,草被根系通过直接绕缠固结土体以及间接改善土体构型两方面共同作用增强土壤侵蚀阻力。分析各试验小区土壤理化性质发现(表 4),相较于裸地小区,草被小区的有机质含量、平均重量直径、粘结力、饱和导水率、土壤孔隙度及土壤 pH 等参数均不同程度地呈显著增加趋势。而土壤容重则显著降低,这表明草被小区的表层土壤理化性质较裸地小区明显改善,同时混播草地在改善表层土壤结构的稳定性及入渗特征方面的作用显著高于单播草地。此外,在地上冠层盖度相近的情况下(表 5),草被小区的根系特征则差异显著,表现为高羊茅小区的根长密度及根表面密度远远高于苜蓿小区,但其体积密度却显著低于苜蓿小区。进一步分析各草被小区不同径级根系参数占比特征发现(图 6),高羊茅小区的植物根系主要由<2 mm 径级的根系组成,其中尤其以<1 mm 径级的根系占比最高,该径级下的根长密度占比、根体积密度占比及根表面积密度占比分别为 95.4%、55.4%和 80.6%;而苜蓿小区的植物根系主要由>2 mm 径级的根系组成,如该径级下的根体积密度占比和根表面积密度占比分别为 88.7%和 57.2%。上述高羊茅与苜蓿小区根系形态参数的差异主要归因于二者的根系类型不同所致,直根系的苜蓿主根极为发达,侧根不发达,故其根系总体积密度较大,且主要由>2 mm 径级的粗根组成;而须根系的高羊茅没有明显的主根与侧根,其根系由茎基部长出的丛生须状的不定根组成,故其根长及根表面密度巨大,且主要由<1 mm 径级的细根组成。混播草地(高羊茅+苜蓿)小区的根长密度及<0.5 mm 径级的根长密度占比居于最高(表 5 和图 6),同时因兼具有须根系及直根系植物固土能力的特点,故相较于单播草地而言,其根系在土壤中通过穿插、绕缠、固结等作用,能更有效地改善土体构型,进而增强土壤侵蚀阻力。

表 4 裸地及草被小区 0—10cm 表层土壤理化性质

Table 4 The physico-chemical soil properties of the topsoil layer for the bare slope and grassland vegetation plots (0—10 cm)

地面覆盖 Ground cover	有机质含量 Soil organic matter/ (g/kg)	平均重量直径 Mean weight diameter/mm	粘结力 Soil cohesion/kPa	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/ (mm/min)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	土壤总孔隙度 Total soil porosity/%	pH
裸地 Bare slope	1.22±0.84c	0.16±0.03b	12.15±2.60b	0.16±0.02c	1.47±0.18a	35.28±4.57b	8.11±0.06d
高羊茅 <i>F. elata</i>	3.69±0.79ab	0.17±0.02b	12.84±1.11b	0.20±0.03ab	1.41±0.35ab	42.96±2.81a	8.90±0.13a
苜蓿 <i>M. sativa</i>	3.19±0.46b	0.16±0.02b	13.03±3.66b	0.18±0.01b	1.39±0.21bc	44.89±2.57a	8.70±0.10b
高羊茅+苜蓿 <i>F. elata</i> + <i>M. sativa</i>	4.65±0.91a	0.19±0.02a	14.90±2.09a	0.21±0.01a	1.34±0.17bc	43.65±1.81a	8.67±0.11bc

同一列不同小写字母表示不同地面覆盖间差异显著($P<0.05$)

表 5 草被小区地上冠层与地下根系参数特征

Table 5 Parameter characteristics of the aboveground and underground parts in the grassland vegetation plots

草地植被 Grassland vegetation	地上冠层部分 Aboveground part				地下根系部分 Underground part		
	生物量 Biomass/ (g/m ²)	株高 Height/cm	盖度 Coverage/%	地径 Stem diameter/mm	根长密度 Root length density/ (cm/m ³)	根体积密度 Root volume density/ (cm ³ /m ³)	根表面积密度 Root surface area density/ (cm ² /m ³)
高羊茅 <i>F. elata</i>	282.19±12.30a	37.03±8.52a	53.2±1.9a	7.06±0.51a	113483.31±11236.04ab	471.59±38.49b	16690.80±10256.12a
苜蓿 <i>M. sativa</i>	157.46±6.32c	26.54±6.34c	49.1±2.7a	5.81±0.90b	97077.99±34978.17b	765.2±397.97a	8914.42±4602.39c
高羊茅+苜蓿 <i>F. elata + M. sativa</i>	207.77±8.86b	29.07±7.79bc	52.1±1.6a	6.93±0.47ab	124280.37±8168.93a	553.88±90.35b	12005.38±1018.80b

同一列不同小写字母表示不同草被类型间差异显著 ($P < 0.05$)

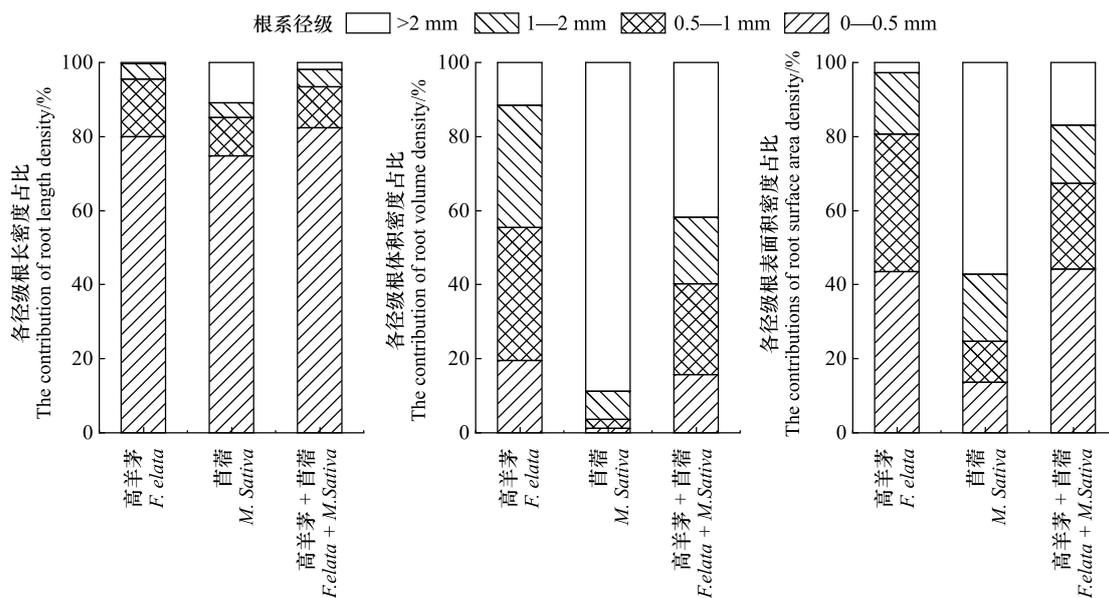


图 6 草被小区不同径级根系参数占比特征

Fig. 6 Characteristics of root parameters proportion of different diameter classes in the grassland vegetation plots

3 讨论

3.1 草被类型及其地上、地下部分对坡面侵蚀过程的调控

草被具有积极的保持水土的作用^[21]。草保持水土的功能是其地上枝叶、植物茎秆和地下根系共同作用的结果。对于不同的草被类型,即便在相同的盖度条件下,其冠层形态结构、根系几何构型及空间分布特征等均存在差异,进而影响其对侵蚀过程的调控效应。

本研究中,相同部位下的混播草地的减流减沙效益高于单播草地,且高羊茅的减流减沙效益高于苜蓿,与裸地相比,高羊茅、苜蓿及高羊茅+苜蓿在各部位处理下的平均减流效益分别为 15.31%、13.26%和 19.36%,平均减沙效益分别为 56.43%、52.57%和 60.42%(表 1),这与许多学者的研究结果相似。Li 等^[22]通过野外 3 种牧草小区模拟降雨试验发现,相较于沙打旺与大波斯菊,苜蓿因具有浓密的冠层结构及细根特征,从而表现出极佳的土壤侵蚀控制效果。同样,Zhang 等^[12]采用室内草被小区模拟降雨试验指出,与香根草相比,冠层低密、细根发达的糖蜜草在减小坡面侵蚀中的作用更为显著。本研究中的高羊茅与苜蓿皆为适宜陕北黄土区生长的水土保持优良牧草,但其植物学特征的差异导致其水土保持功能有所不同。表 5 说明了高羊茅与苜蓿小区在形态特征上的差异,在种植密度相同的情况下,直根系苜蓿小区的茎秆相对低矮、细小,地上冠层生物量

也较为稀疏(可能与小区立地条件限制了水分利用从而影响其生长有关),其根系体积密度主要由 >2 mm 径级的粗根组成;须根系高羊茅小区的地上冠层生物量较为丰富,其丛生簇状的植物茎秆也较为粗壮,发达而致密的须根结构使得其抑制侵蚀过程的效应常常优于直根系苜蓿;而高羊茅+苜蓿混播草地由于充分利用了光热养分及空间资源,其植物根系形态特征发育良好(如根长密度居于最高),同时由于混播草地植物根系加筋效应和交织效应的叠加作用,极大地增加了根系与表土形成的根-土复合体抗剪强度^[23],故相较于单播草地而言,混播草地控制侵蚀的效果最佳。此外,草被地上冠层与根系对减流减沙效益的相对贡献有所差异(图 4),草被冠层(叶与茎)减流的相对贡献高于根系,而根系减沙的相对贡献却高于草被冠层,这与以往的研究结果一致^[10, 24-25]。这是因为草被冠层对截留降雨、削弱雨滴击溅动能、延缓地表径流发生起主导作用。而草被根系通过绕缠固结及改善土体构型两方面的共同作用有效增强了土壤抗侵蚀能力,故其在控制侵蚀产沙方面发挥着关键作用。

3.2 草被类型及其地上、地下部分对坡面径流水动力学特征的调控

地表产流后,坡面径流成为土壤侵蚀的主要动力。流速、流态和阻力特征是表征坡面径流水动力学特征的常用指标。本研究中,相同部位下的混播草地对坡面径流的减速增阻效益大于单播草地,且高羊茅的减速增阻效益大于苜蓿,相较于裸地,高羊茅、苜蓿及高羊茅+苜蓿在各部位处理下的平均减速效益分别为 26.0%、24.3%和 29.0%,平均增阻效益分别为 160.9%、142.2%和 204.0%(表 2),同时草被垂直结构越完整,其对坡面径流的减速增阻效益也越大,并且草被在一定程度上减缓了坡面径流流态,试验条件下各坡面小区的径流属层流缓流范畴,这与之前的研究结果基本一致^[14]。因植物类型的不同可导致其对坡面径流水动力学特征的影响存在明显差异^[26]。高羊茅叶片扁平呈线状,其前端柔性部分匍匐于地表,茎秆圆形、直立且粗壮、簇生,同时须根系高羊茅发达的细根结构对降低土壤容重、增加土壤入渗、提高土壤有机质含量及水稳性团聚体数量等均起到了积极作用(表 4),高羊茅上述形态特征使得其延缓坡面径流流速及增加坡面径流阻力的效益明显;而苜蓿叶片为羽状复叶,小叶片呈卵形,茎秆直立,根系为主根发达、侧根不发达的直根系类型,其粗壮的根系在生长过程中穿插土壤,形成了较大的根孔,极大地增加了土壤孔隙度,促进了降雨的入渗。与此同时,因植物生态学特性的差异^[27],高羊茅生长迅速,对土壤的适应性强,既耐旱也耐湿;而苜蓿抗干旱但不耐水淹,夏季多雨、湿热的条件对苜蓿生长极为不利,导致其地上生物量显著低于同密度下的高羊茅(表 5)。此外,受连续降雨的影响,草被小区表层土壤水分充盈使得植物根系会在地表生长,这种现象主要出现在须根系高羊茅小区中,加之禾本科的高羊茅在植物基部分蘖后形成了簇状的分枝,从而使得高羊茅阻碍、分散地表径流的能力明显高于苜蓿。试验中豆禾混播草地(高羊茅+苜蓿)因充分利用了水、肥、光等资源,其植物形态特征发育良好,并且豆禾混播草地的根系分布深度不同,更有助于改善土壤结构,这在以往的研究中已得到证实^[28],由于兼具有高羊茅与苜蓿的综合作用,故混播草地对地表径流的减速增阻效益明显高于单播草地。本研究还表明草被地上部分(叶与茎)对坡面径流的减速增阻效益显著高于根系,究其原因,在于草被地上部分在降雨过程中呈倒伏状使得其跟地面接触较多,从而对坡面流速的影响较大,此外,直接覆盖于地表的草被冠层对坡面径流的形态阻力及波阻力影响较大^[29]。可见,草被调控坡面降雨径流侵蚀动力主要通过地上部分对坡面径流的流速和阻力的影响来实现,其对坡面径流水动力学参数的影响与草被类型及相应的植物学特征密切相关。

3.3 草被类型及其根系对坡面侵蚀阻力的调控

土壤侵蚀阻力是指土壤抵抗侵蚀的能力,在坡面侵蚀过程中可用土壤可蚀性 K (s/m) 和土壤临界剪切力 τ_c (Pa) 定量表征^[9-10]。本研究将侵蚀过程中各坡面处理小区产生的坡面侵蚀率与水流剪切力线性拟合得到了表征各小区土壤侵蚀阻力的参数(土壤可蚀性和土壤临界剪切力)(表 3)。相较于裸地,草被根系小区、除叶小区及全株小区的土壤可蚀性分别减小了 50.98%、66.24%和 72.78%,相应的土壤临界剪切力分别增加了 190%、220%和 180%,可见裸地坡面生长草本植物后,主要通过植物根系来增强土壤侵蚀阻力,这与前人的研究结果基本一致^[17, 30]。进一步分析发现草被小区表层土壤理化性质要明显优于裸地小区(表 4),这也正是

本研究中小草被小区土壤侵蚀阻力得以增强的内在原因。事实上,土壤侵蚀阻力反映了土壤自身理化性质对侵蚀营力的抵抗能力^[31]。植被生长发育导致其根系密度增大,会引起土壤可蚀性和土壤临界剪切力发生变化,从物理本质上看,土壤可蚀性与土壤临界剪切力随土壤性质的变化呈相反趋势^[32],这在本研究中也得到了实证,相关分析表明(图7),土壤可蚀性随土壤有机质含量、土壤总孔隙度、植物根长密度及<0.5 mm 径级的根长密度呈显著负相关关系($P<0.05$)。相反,土壤临界剪切力与土壤有机质含量及土壤饱和导水率呈显著正相关关系($P<0.05$),土壤可蚀性与土壤临界剪切力间则呈显著负相关关系($P<0.05$)。此外,与裸地相比,高羊茅、苜蓿及高羊茅+苜蓿小区的土壤可蚀性分别减小了 65.87%、54.39%和 69.75%,相应的土壤临界剪切力分别增加了 190%、180%和 220%,说明混播草地增强土壤侵蚀阻力的效益高于单播草地,且高羊茅增强土壤侵蚀阻力的效益高于苜蓿,草被间土壤侵蚀阻力的差异归根到底是由于根系类型不同所致,与直根系的苜蓿相比(其根系总体积密度主要由>2 mm 径级的粗根组成),须根系的高羊茅因具有发达的细根结构(其根长及根表面积密度巨大,且主要由<1 mm 径级的细根组成)(表5与图6),故其在改善表土理化性质,进而增强土壤侵蚀阻力的能力方面优于直根系苜蓿,这在以往的研究中得到了大量证实^[33]。须根系草被在提高土壤抗侵蚀能力的功效上往往较直根系显著,这主要归因于须根系草被大量细根在土体中缠绕交织形成了致密的根系网络,大大增强了土体结构的稳定性,同时伴随细根生长活动,通过根系分泌物与根系周转的胶结作用,直接促进了土壤中大粒级水稳性团聚体的形成,从而提高了土壤抗侵蚀的能力^[34]。本研究中混播草地增强土壤侵蚀阻力的效益高于单播草地,这可能与豆禾混播草地中的促进作用有关^[13]。研究表明,豆科+禾本科混播体系中,豆科植物的生物固氮作用及物种间的竞争能够促进植物根系生长,使混播区根系在土壤中的分布更加广泛^[35]。本试验中的豆禾混播草地根长密度明显高于单播草地(表5),且混播草地中<0.5 mm 径级下的根长密度占比也高于单播草地(图6),说明本试验中豆禾混播草地增加了根系长度及细根比例,这在以往的研究中已被证实^[28]。故相较于单播草地,混播草地较大的根长密度及稠密的细根结构(特别是<0.5 mm 的

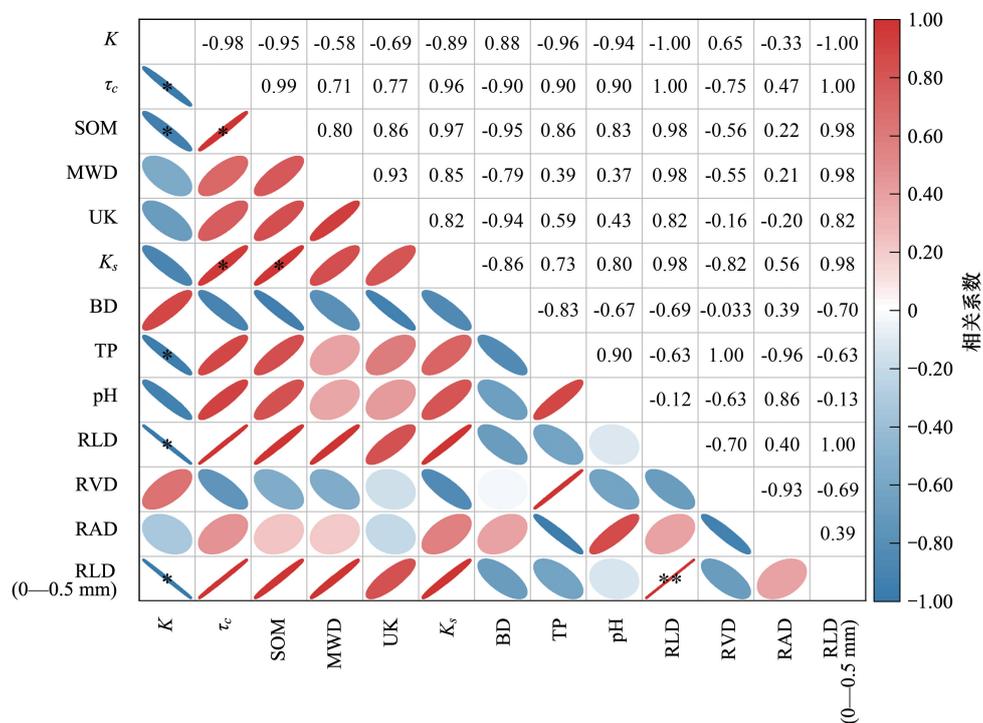


图7 土壤可蚀性与土壤理化性质和根系参数间的相关性

Fig.7 Correlation of soil erodibility with soil physico-chemical properties and root parameters

K:土壤可蚀性; τ_c :土壤临界剪切力;SOM:土壤有机质含量;MWD:平均重量直径;UK:粘聚力; K_s :饱和导水率;BD:容重;TP:土壤总孔隙度;RLD:根长密度;RVD:根体积密度;RAD:根表面积密度

细根)显著增加了土壤粘结力及团聚体平均重量直径(表4),其对改善表土理化性质的作用更明显,从而大幅提高了土壤抗侵蚀能力。

4 结论

本文通过人工模拟降雨试验,系统研究了不同雨强下高羊茅、苜蓿和高羊茅+苜蓿3种草被及其不同部位(叶、茎、根)对陕北黄土坡面侵蚀过程、径流侵蚀动力及土壤侵蚀阻力的影响,主要结论归纳为:

(1)混播草地的减流减沙效益高于同部位的单播草地,且高羊茅的减流减沙效益高于同部位的苜蓿。高羊茅、苜蓿及高羊茅+苜蓿3种草被的平均减流效益分别为15.31%、13.26%和19.36%,相应的平均减沙效益分别为56.43%、52.57%和60.42%。草被垂直结构越完整,其减流减沙效益越明显。草被地上部分(叶与茎)对于减小径流起主要作用,而根系在控制侵蚀产沙方面则发挥主导作用。

(2)混播草地对坡面径流的减速增阻效益大于同部位的单播草地,且高羊茅的减速增阻效益大于同部位的苜蓿。草被垂直结构越完整,其对坡面径流的减速增阻效益越大。草被地上部分对坡面径流的减速增阻效益显著高于根系。相较于裸地,草被叶、茎、根系平均减速效益分别为13.9%、20.1%、8.4%;相应的平均增阻效益分别为113.3%、128.9%、45.3%。不同雨强下,各试验小区坡面径流属层流缓流范畴。随着雨强的增大,各试验小区的流速、雷诺数均呈增加趋势,而Darcy-Weisbach阻力系数呈减小趋势。

(3)混播草地增强土壤侵蚀阻力的效益高于单播草地,且高羊茅对土壤侵蚀阻力的增强效益高于苜蓿。与裸地相比,高羊茅、苜蓿及高羊茅+苜蓿小区的土壤可蚀性分别减小了65.87%、54.39%和69.75%,相应的土壤临界剪切力分别增加了190%、180%和220%。草被垂直结构越完善,其增强土壤侵蚀阻力的效益越高。草被根系在增强土壤侵蚀阻力方面的作用远高于地上部分,这主要源于根系通过生长活动改善了表层土壤性质,进而增强了土壤抗侵蚀能力。草被间土壤侵蚀阻力的差异归根到底是由于根系类型不同所致,须根系高羊茅因具有发达的细根结构,其在改善表土理化性质、增强土壤侵蚀阻力方面的作用优于直根系苜蓿;相较于单播草地而言,高羊茅+苜蓿混播草地因具有较大的根长密度及稠密的细根结构(特别是<0.5 mm的细根),故其表土理化性质得到显著改善,从而表现出更佳的土壤抗侵蚀能力。

参考文献(References):

- [1] Pan C Z, Ma L, Wainwright J, Shanguan Z P. Overland flow resistances on varying slope gradients and partitioning on grassed slopes under simulated rainfall. *Water Resources Research*, 2016, 52(4): 2490-2512.
- [2] Chen H, Zhang X P, Abba M, Lü D, Yan R, Ren Q F, Ren Z Y, Yang Y H, Zhao W H, Lin P F, Liu B Y, Yang X H. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2018, 170: 141-149.
- [3] Zhou S X, Li P, Zhang X M, Wang Y Q, Yu K X, Shi P, Xiao L, Wang T, Chang E H. Runoff and erosion reduction benefits of vegetation during natural succession on fallow grassland slopes. *Science of The Total Environment*, 2024, 954: 176211.
- [4] Li J M, Li H, Guo M M, Ding W F, Zhang C W, Liu J G, Xu W S, Tong X X, Sun B Y. Influences of vegetation types and near-surface characteristics on hydrodynamics and soil erosion of steep spoil heaps under rainfall and overland flow conditions. *Soil and Tillage Research*, 2025, 247: 106378.
- [5] Wei S E, Zhang K D, Liu C L, Cen Y D, Xia J Q. Effects of different vegetation components on soil erosion and response to rainfall intensity under simulated rainfall. *Catena*, 2024, 235: 107652.
- [6] Duan J, Liu Y J, Wang L Y, Yang J, Tang C J, Zheng H J. Importance of grass stolons in mitigating runoff and sediment yield under simulated rainstorms. *Catena*, 2022, 213: 106132.
- [7] Wang J F, Yang Y F, Liu G B, Wang B, Zhang F B, Fang N F. Investigating the effects of herbaceous root systems on the soil detachment process at the species level. *Science of The Total Environment*, 2023, 859: 160196.
- [8] Zhou Z C, Shanguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall. *Catena*, 2007, 70(3): 350-355.
- [9] Li J M, Li L, Wang Z G, Zhang C W, Wang Y F, Wang W L, Zhang G H, Huang J Q, Li H, Lv X D, Pu J, Liu J G. The contributions of the roots, stems, and leaves of three grass species to water erosion reduction on spoil heaps. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127003.
- [10] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, Wang G Q, Xu Z. The contribution of *Astragalus adsurgens* roots and canopy to water erosion control in the water-

- wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 265-273.
- [11] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, Li P. Experimental study on slope runoff, erosion and sediment under different vegetation types. *Water Resources Management*, 2014, 28(9): 2415-2433.
- [12] Zhang S Y, Zhuo M N, Xie Z Y, Yuan Z J, Wang Y T, Huang B, Liao Y S, Li D Q, Wang Y. Effects of near soil surface components on soil erosion on steep granite red soil colluvial deposits. *Geoderma*, 2020, 365: 114203.
- [13] 谢开云, 赵云, 李向林, 何峰, 万里强, 王丹, 韩冬梅. 豆-禾混播草地种间关系研究进展. *草业学报*, 2013, 22(3): 284-296.
- [14] 陈浩, 王豆豆, 崔钦凯, 王博, 刘俊娥, 李占斌. 草地植被冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程的影响. *生态学报*, 2024, 44(15): 6841-6853.
- [15] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨标准. *水土保持通报*, 1987, 7(1): 38-44.
- [16] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(6): 509-515.
- [17] Wang B, Li P P, Huang C H, Liu G B, Yang Y F. Effects of root morphological traits on soil detachment for ten herbaceous species in the Loess Plateau. *Science of The Total Environment*, 2021, 754: 142304.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978: 11-147.
- [19] Wang P P, Su X M, Zhou Z C, Wang N, Liu J E, Zhu B B. Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China. *Catena*, 2023, 220: 106693.
- [20] 张光辉. 土壤分离过程对植被恢复的响应与机理. 北京: 科学出版社, 2020: 132-134.
- [21] Wang D D, Yuan Z J, Cai Y T, Jing D W, Liu F, Tang Y, Song N N, Li Y Y, Zhao C Y, Fu X Y. Characterisation of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions; a review. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112165.
- [22] Li C J, Pan C Z. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 90-103.
- [23] 郭洋楠, 宫传刚, 杨剑, 朱国庆. 草本植物对边坡稳定性影响研究进展. *草地学报*, 2022, 30(4): 841-849.
- [24] 赵炯昌, 卫伟, 段兴武. 模拟降雨下黄土坡面水沙过程对3种灌草植被垂直结构变化的响应. *生态学报*, 2021, 41(21): 8602-8611.
- [25] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 周正朝, 上官周平. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程. *生态学报*, 2010, 30(9): 2387-2396.
- [26] 蒋忙舟, 汪建芳. 黄土高原典型群落近地表特征对坡面流水动力学特征的影响. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 61-68.
- [27] 王贤. 牧草栽培学. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 93-153.
- [28] 朱亚琼, 郑伟, 王祥, 关正翮. 混播方式对豆禾混播草地植物根系构型特征的影响. *草业学报*, 2018, 27(1): 73-85.
- [29] 张思毅, 梁志权, 谢真越, 卓慕宁, 郭太龙, 廖义善, 韦高玲, 李定强. 白三叶不同部位减沙效应及其对径流水动力学参数的影响. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1306-1314.
- [30] Liu J E, Zhang X C, Zhou Z C. Quantifying effects of root systems of planted and natural vegetation on rill detachment and erodibility of a loessial soil. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104420.
- [31] 余新晓, 张光辉, 史志华, 贾国栋. 水土保持学导论. 北京: 科学出版社, 2019: 82-84.
- [32] 张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 21-30.
- [33] Wang B, Zhang G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1567-1576.
- [34] 王晶, 赵文武, 刘月, 贾立志. 植物功能性状对土壤保持的影响研究述评. *生态学报*, 2019, 39(9): 3355-3364.
- [35] 芦奕晓, 牟乐, 杨惠敏. 豆科与禾本科牧草混播改良土壤的研究进展. *中国草地学报*, 2019, 41(1): 94-100.