

DOI: 10.20103/j.stxb.202401030015

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.

Chen H, Wang D D, Cui Q K, Wang B, Liu J E, Li Z B. Effects of canopy and root of grassland vegetation on erosion processes of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6841-6853.

草地植被冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程的影响

陈 浩^{1,2,3}, 王豆豆¹, 崔钦凯⁴, 王 博¹, 刘俊娥⁴, 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

3 陕西省区域生物资源保育与利用工程技术研究中心, 延安 716000

4 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

摘要:草地植被能有效控制坡面侵蚀,然而不同草地植被类型及其冠层与根系对坡面侵蚀过程的调控作用尚缺乏系统研究。采用人工模拟降雨方法,定量研究了不同雨强下苜蓿与黑麦草冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程、径流侵蚀动力及土壤抗侵蚀能力特征的影响。结果表明:与裸坡相比,苜蓿与黑麦草的平均减流效益分别为 17.65% 和 9.80%,减沙效益分别为 63.86% 和 69.88%。不同雨强下两种草被根系减流减沙的平均相对贡献均高于冠层,且根系减沙的相对贡献随雨强的增加而增大。草地植被主要通过削减坡面径流流速和增加坡面阻力的方式实现对降雨径流侵蚀动力的调控,草被根系对坡面径流的减速作用略大于冠层,但其增阻作用却明显小于冠层。黑麦草对坡面径流的减速增阻效益高于相同部位的苜蓿。坡面土壤侵蚀率与水流切应力的关系可用幂函数 $y = \alpha x^\beta$ 较好地拟合。幂函数系数 α 解释为单位水流切应力所引起的土壤侵蚀模数,可作为反映土壤抗侵蚀能力的指标。草被根系作用下的幂函数系数减幅远高于冠层,反映了其增强土壤抗侵蚀能力作用明显高于冠层,这主要源于草被根系结构对表层土壤性质的改善。须根系黑麦草强化土壤抗侵蚀能力优于直根系苜蓿。本研究揭示了草地植被调控坡面侵蚀过程是通过地上冠层与根系的共同作用达到同时调控侵蚀动力和土壤抗侵蚀能力实现的,草被根系对坡面侵蚀控制起主导作用,且以须根系草被对黄土坡面侵蚀的调控效果最佳。上述结果可为草地侵蚀过程研究及黄土高原草被建设与管理提供科学依据。

关键词:土壤侵蚀过程;水动力学参数;土壤抗侵蚀能力;冠层;根系;黄土高原

Effects of canopy and root of grassland vegetation on erosion processes of the Loess Plateau

CHEN Hao^{1,2,3}, WANG Doudou¹, CUI Qinkai⁴, WANG Bo¹, LIU Jun'e⁴, LI Zhanbin^{2,*}

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

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

3 Shaanxi Engineering and Technological Research Center for Conservation and Utilization of Regional Biological Resources, Yan'an 716000, China

4 School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: Grassland vegetation can effectively control slope erosion. However, the regulation effects of different grassland vegetation types and their canopies and roots on slope erosion have not been systematically studied. In this study, artificial simulated rainfall experiments were used to quantitatively study the effects of canopies and roots of alfalfa (*Medicago sativa*) and ryegrass (*Lolium perenne*) on soil erosion processes of loess slope, hydrodynamic parameters and soil erosion resistance characteristics under different rainfall intensities. The results showed that the average runoff reduction benefit of alfalfa and

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);延安市高层次人才专项项目(2019-16);延安大学科研计划资助项目(YDBK2019-63)

收稿日期:2024-01-03; **网络出版日期:**2024-05-24

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

ryegrass was 17.65% and 9.8%, and the sediment reduction benefit was 63.86% and 69.88%, respectively, compared to bare slope. The average relative contribution rates of the roots to the benefit of the runoff reduction and sediment reduction were higher than those of the canopies under different rainfall intensities. And the relative contribution rate of the roots to the benefit of the sediment reduction increased with the increase of rainfall intensity. Grassland vegetation regulated erosion dynamics mainly by reducing flow velocity and increasing slope resistance. The effect of the roots in decreasing flow velocity was slightly greater than that of the canopies, but the effect of the roots in increasing slope resistance was obviously smaller than that of the canopies. The effects of ryegrass in decreasing flow velocity and increasing slope resistance were higher than those of the same part of alfalfa. A power function $y = \alpha x^\beta$ fitted better in flow shear stress and slope erosion rate relationship. The coefficient α of the power function can be interpreted as the modulus of soil erosion caused by unit flow shear stress, and can be used as an index to reflect soil erosion resistance. The reduction benefit of the coefficient α under the action of the roots was much higher than that of the canopies, which reflected that the roots had significantly enhanced soil erosion resistance compared to the canopies. The enhancement of soil erosion resistance was mainly attributed to the improvement of soil properties in the topsoil layer by the roots of grassland vegetation. In this study, bulk density of grassland vegetation plots decreased significantly, and soil organic matter, soil porosity, saturated hydraulic conductivity, mean weight diameter of soil aggregates and shear strength of them increased obviously compared to bare slope plot. The soil properties of the grassland vegetation plots were obviously improved, which consequently enhanced the soil erosion resistance. The roots of grassland vegetation improved the soil properties in the topsoil layer, and its ability to enhance soil erosion resistance was much greater than that of the canopies. Furthermore, the ability of ryegrass with fibrous root system to strengthen soil erosion resistance was better than that of alfalfa with taproot system. The study revealed that grassland vegetation could control slope erosion processes through the joint action of canopies and roots to regulate erosion dynamics and soil erosion resistance, simultaneously. The roots of grassland vegetation played a leading role in controlling slope erosion, and grassland vegetation with fibrous root system had the best effect on the control of loess slope erosion. The results can provide scientific support for the study of soil erosion processes of grassland and the construction and management of grassland on the Loess Plateau.

Key Words: soil erosion processes; hydrodynamic parameters; soil erosion resistance; canopy layer; root; the Loess Plateau

土壤侵蚀是危及人类生存与发展的全球性环境问题,在我国黄土高原地区尤为突出。黄土高原地区的土壤侵蚀以水力侵蚀为主,其中坡面水力侵蚀居于重要地位,是黄土高原严重侵蚀产沙的重要根源^[1-2]。草地植被是控制土壤侵蚀的有效措施,因此有关草地植被对坡面侵蚀过程影响一直是学者们关注的重点^[3-5]。

坡面土壤侵蚀是侵蚀动力(降雨径流侵蚀动力)与侵蚀阻力(土壤抗侵蚀能力)相互作用的结果。草地植被调控坡面侵蚀过程是通过地上部分和地下根系调控侵蚀动力与侵蚀阻力实现的。从侵蚀动力学机制来讲,草地植被地上部分主要通过截留降雨、消减降雨打击力、增加水力糙率和减缓径流流速等方式阻控侵蚀动力^[6-8],而地下根系则通过绕缠固结土体、促进团聚体的形成、增加土壤入渗能力和提高土壤抗剪强度等途径强化侵蚀阻力^[9]。草被造成侵蚀动力和侵蚀阻力的变化必然引起坡面侵蚀过程的相应变化。因此,研究草地植被地上部分与地下根系对坡面侵蚀过程的影响,是深入揭示草被调控坡面侵蚀机理和开展土壤侵蚀防治的重要基础,也是土壤侵蚀与水土保持研究领域关注的重要科学问题。为深入认识草地植被地上部分与根系对坡面侵蚀过程的影响,学者通常采用剪掉地上部分直接对比的方法,在分离和量化草被地上部分和根系对减小侵蚀的相对作用方面开展了卓有成效的探索^[10]。研究通常认为,草被冠层对减小地表径流的作用最大,而根系在控制侵蚀产沙过程中则发挥着主导作用^[11-12,6],但也有研究表明,草被根系与冠层在减小土壤侵蚀方面的作用几乎相当^[13],甚至有研究指出,草被冠层对减小侵蚀的作用较根系的作用更大^[14]。究其原因,可能主要是因为植物类型导致了草被冠层与根系对侵蚀作用大小的差异。不同的植物类型,其冠层结构与密集

程度、根系结构类型及分布状况等均存在明显不同,从而导致其对侵蚀的调控作用存在较大差异。以往研究较多关注于草被地上、地下垂直覆盖结构在坡面减流减沙效益中的作用大小,而很少从侵蚀水动力学角度系统分析不同草被类型及其冠层与根系差异对坡面侵蚀过程的影响。

草地植被是黄土高原最主要的植被类型,在干旱半干旱的黄土区,大面积植树造林受到当地立地水分的植被承载力制约,从而使得草地植被的恢复与重建成为该区生态环境建设的重要部分。在此背景下,开展草地植被冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程影响的研究,对比分析草地植被去除冠层前后的土壤侵蚀效应,对阐明草被调控坡面侵蚀动力机制及评估草地管护具体措施(诸如收割地上牧草喂养牲畜等行为)的侵蚀风险具有重要的理论及实践意义。因此,笔者结合黄土高原的气候及土壤环境,选择有一定利用价值的牧草品种(苜蓿与黑麦草)为研究对象,采用人工模拟降雨方法,对比研究不同雨强下两种草地植被类型及其冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程、径流侵蚀动力及土壤抗侵蚀能力特征的影响,旨在为草地侵蚀过程研究及黄土高原草被建设与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验土壤为黄绵土,取自黄土高原腹地陕西省延安市安塞区梁峁坡距地表 3 m 以下的黄土母质层土壤,可认为该层土壤没有受到人为扰动和植物根系活动的影响。将野外采回的土壤过 2 mm 的土壤筛后,获得试验所用土壤。模拟降雨试验于 2022 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进行。降雨实验室为密闭环境,配有降雨器、激光雨滴谱仪、移动式变坡土槽等。降雨器为西安森森电子科技有限公司研制开发的下喷式模拟降雨系统(MSR-S20-W1100 型),主要由供水系统、控制系统、智能终端、采集系统等构成。降雨高度为 5 m,降雨面积为 20 m²,降雨喷头为旋转下喷式喷头,喷头的布设方式为大中小三种规格(1#、2#和 3#)的喷头围成一个等边三角形的喷头组,四个喷头组在空间上组合叠加,形成一个雨强均匀的降雨区。该降雨系统根据预先设定的降雨强度或压力,通过手持式智能终端无线控制不同喷头开关组合状态及调节喷头水压,可模拟不同雨强的自然降雨。所模拟的雨滴粒径为 0.3—6 mm,降雨强度为 18—200 mm/h,降雨调节精度为±5 mm/h 且降雨均匀度大于 85%。每次降雨试验前会对降雨强度和降雨均匀度进行率定,并将测量误差控制在±5%的允许范围内。在试验降雨区内按水平和垂直方向每隔 50 cm 均匀放置 1000 ml 塑料烧杯承接降雨,经过一定时间后用量筒测定烧杯内的雨量,并通过测算烧杯口面积求得实际的降雨强度。降雨均匀度采用以下公式计算求得:

$$p = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |I_i - I|}{n \bar{I}} \quad (1)$$

式中: p 为降雨均匀度(%); I_i 为第 i 测点降雨强度(mm/min); I 为设定降雨强度(mm/min); $\bar{I}$ 为平均降雨强度(mm/min)。

1.2 试验设计及试验过程

1.2.1 试验小区

试验小区为长 200 cm,宽 50 cm,深 40 cm 的移动式变坡土槽,土槽前端为 V 型集流槽,用于收集径流泥沙样,土槽底部按 10 cm 的孔间距均匀开孔。土槽装填时,先在槽内装填 5 cm 厚的细沙,并在细沙上铺设一层透水纱布,使得土壤水分能自由下渗。接着将供试土壤按照 1.2 g/cm³ 的设计容重分层(每层 5 cm)装填到土槽中,装填厚度为 35 cm,每层土壤刮毛以防止土层间的滑动,土层与槽子边壁结合处尽量压实,以减小边壁效应的影响,装填结束后,将土面平整建成裸坡小区。草被小区种植时间为 2022 年 4 月下旬,选择黄土高原常见的牧草品种苜蓿(*Medicago sativa*)与黑麦草(*Lolium perenne*)草种在裸坡小区上以穴播的方式品字形均匀种植,根据前期预实验及相关研究^[9],确定种植密度为 180 株/m²,并最终建成草被小区。裸坡及草被小区

均设置 2 个重复。草被小区种植后保持土壤湿润,以促进种子萌发,种子出苗后对其进行精细管护,期间定期浇水、施肥、修剪、拔除杂草、铲除生物结皮等,保证各草被小区重复处理间差异较小,待草被生长 3 个月成熟后开始试验。

1.2.2 试验过程

试验利用 2 个种植了相同草被类型的土槽依次进行完整草被与去冠层草被的小区模拟降雨试验。首先进行完整草被(冠层+根系)小区降雨试验,测定草被冠层与根系共同作用下的坡面侵蚀过程。试验设计坡度为 15° ,降雨强度根据黄土高原土壤侵蚀暴雨标准确定为 1 mm/min 、 1.33 mm/min 、 1.67 mm/min ^[15],并按照从小到大的顺序依次进行,各雨强重复一次。在每场降雨试验后,将土槽移至室外自然风干 3—4 d 后再进行下一场降雨试验。由于植株的保护,草被小区每次的侵蚀产沙量极少(0.23 g — 1.29 g),加之试验后的自然恢复,小区坡面状况变化微小。待完整草被小区降雨试验结束后,对土面进行适当修复,将其在室外放置一段时间,保证草被小区下垫面条件基本一致,然后贴地面剪除草被小区地上部分,作为去冠层草被小区进行模拟降雨试验,测定仅有草被根系作用下的坡面侵蚀过程。其设计降雨雨强及场次安排与完整草被小区完全一致。裸坡小区作为对照重复上述处理。由于整个模拟降雨试验在 1 个月内完成,故假定期间草被生长对下垫面状况的影响忽略不计。降雨试验具体观测过程为:为了消除前期土壤水分状况不同对试验结果的影响,正式试验前均对土槽进行雨强 0.5 mm/min 的预降雨,直到小区产流为止,静置 12 h 后进行正式降雨,降雨历时为产流后 45 min,产流后的前 10 min 每隔 2 min 用量筒采集一次径流泥沙全样,10 min 后每隔 5 min 收集一次径流泥沙全样,待降雨结束,读取浑水体积,然后澄清撇掉清水,转移至料缸,烘干称重后,通过计算可获得泥沙量、侵蚀率、径流深、径流率等参数。降雨过程中采用高锰酸钾染色剂测定小区固定断面坡面径流流速,将坡面分为上、下 2 个断面,每个断面分别在左、中、右三个位置测定水流表面最大流速,同时记录水流温度,并根据计算得到的水流雷诺数判断其流态为层流,乘以修正系数 0.67 ^[16],获得断面水流平均流速。

1.2.3 试验测定

草被冠层盖度与地上部分生物量测定:在模拟降雨试验开始前,利用数码相机在草被小区正上方垂直拍摄得到清晰的照片后,导入 Image J 软件,通过将照片中植被选作感兴趣区,利用最小距离法对其进行非监督分类,并对分类结果进行目视判读,归类并统计草被与非草被部分所占像元数,计算得到草被小区植物冠层盖度。在草被小区上、中、下不同位置分别选择具有代表性的 5 株植物,利用钢尺量测获得草被小区平均植物株高。在完整草被小区模拟降雨试验结束后,剪除地上部分冠层后,烘干(65°C , 24 h)获得草被地上部分生物量干重。

草被根系参数测定:在模拟降雨试验结束后,采用特制取样器(长 $\times$ 宽 $\times$ 高= $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$) 在草被小区上、中、下三个位置分别取样,每个位置重复 3 次,共采集 9 个样品,然后将取样器中的根系全部洗出,利用根系扫描分析系统分析根长、根表面积、根体积等参数,在根系参数测定结束后,采用烘干法(65°C , 24 h)测定根系生物量。然后计算得到根长密度、根表面积密度、根体积密度及根质量密度,具体计算方法可参考 Wang 等^[17]。

土壤理化及力学性质测定:在根系样品采样结束后,在每个试验小区上、中、下三个位置分别采集土壤样品,按照土壤理化及力学性质的经典测定方法,开展土壤性质分析实验。具体测定指标及分析方法为,容重和总孔隙度采用环刀法测定;土壤团聚体特征(平均重量直径)利用土壤干筛法与湿筛法测定;土壤有机质采用重铬酸钾—硫酸消化法测定;土壤抗剪强度采用便携式三头抗剪仪测定;饱和导水率采用定水头法测定。

1.3 指标计算及数据分析

1.3.1 水力特征指标

由于坡面径流水层极薄,且下垫面状况不断变化,直接测定其深度较为困难且误差较大,因此,假定坡面径流沿程均匀分布,其水深采用以下公式计算:

$$h = q/V = Q/(V \times bt) \quad (2)$$

式中: h 为坡面径流水深 (cm); q 为单宽流量 (cm^2/s); V 为断面水流平均流速 (cm/s); Q 为时间 t 内的径流量 (cm^3); b 为坡面径流过水断面宽度 (cm); t 为取样间隔时间 (min)。

雷诺数 (Re) 在水力学中的物理意义可理解为水流的惯性力和黏滞力之比, 为无量纲数。根据明渠水流的水力学理论, 当 $Re < 500$ 时, 水流为层流; 当 $Re > 2000$ 时, 水流为紊流; 当 $Re = 500—2000$ 时, 水流为过渡流。弗劳德数 (Fr) 的力学意义是指水流惯性力和重力之比, 为无量纲数。当 $Fr = 1$ 时, 水流为临界流; 当 $Fr > 1$ 时, 水流为急流; 当 $Fr < 1$ 时, 水流为缓流。其计算公式分别为:

$$Re = Vh/u \quad (3)$$

$$Fr = V/\sqrt{gh} \quad (4)$$

式中: u 为水流运动黏滞系数 (m^2/s), $u = 0.01775/(1+0.0337T+0.000221T^2)$, 其中 T 为水温 ($^{\circ}\text{C}$); g 为重力加速度 (m/s^2)。

坡面径流阻力特征常采用 Darcy-Weisbach 阻力系数 (f) 进行描述, 其计算公式为:

$$f = 8ghJ/V^2 \quad (5)$$

式中: J 为水力坡度 (m/m), 采用坡度的正弦值代替。

水流切应力 (τ) 从力的角度反映了径流的水力特性, 是常用的表征径流侵蚀力的综合性水动力学参数, 其计算公式为:

$$\tau = \gamma RJ \quad (6)$$

式中: τ 为水流切应力 (Pa); γ 为水流容重 (N/m^3); R 为水力半径 (m), 对于矩形断面的薄层水流, 可近似用水深 h 代替。

1.3.2 草被不同部位减流减沙效益及其相对贡献

牧草在试验过程中处于成熟旺盛期, 枯落物极少, 且在日常管护中小区生物结皮及时被清除, 因此, 本研究中牧草对坡面侵蚀过程的调控效应为草被冠层与根系共同作用之和, 冠层对坡面流体力特征的影响为完整草被的作用减去根系的作用。

完整草被、根系和冠层减沙效益计算公式分别为:

$$RE_p = (S_b - S_p)/S_b \times 100\% \quad (7)$$

$$RE_r = (S_b - S_r)/S_b \times 100\% \quad (8)$$

$$RE_c = RE_p - RE_r \quad (9)$$

式中: RE_p 、 RE_r 和 RE_c 分别为完整草被、根系和冠层的减沙效益; S_b 、 S_p 和 S_r 分别为裸坡、完整草被坡面和根系坡面的产沙模数, $\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$ 。同理, 可推导出完整草被、根系和冠层的减流效益。

草被根系和冠层减沙效益的相对贡献计算公式分别为:

$$RC_r = RE_r/RE_p \times 100\% \quad (10)$$

$$RC_c = RE_c/RE_p \times 100\% \quad (11)$$

式中: RC_r 和 RC_c 分别为根系和冠层减沙效益的相对贡献率。同理, 可推导出草被根系和冠层减流效益的相对贡献率。

1.3.3 数据分析

采用 SPSS 16.0 数据分析软件进行单因素方差分析和最小显著性差异 (LSD) 检验 ($P = 0.05$)。利用 Origin 2021 进行制图。

2 结果与分析

2.1 草地植被冠层与根系对坡面侵蚀过程的影响

2.1.1 草地植被冠层与根系对坡面产流过程的影响

不同雨强下草地植被小区径流率变化过程如图 1 所示。各坡面小区径流率呈现初期快速增加、中后期趋

于平稳的变化特征,同一雨强下,各坡面小区产流过程存在差异,裸坡径流率的增加速率整体上高于草地植被小区,且草被根系小区径流率的增加速率高于完整草被小区。随着雨强的增加,草地植被小区间径流率变化过程差异明显减小,这表明雨强的增加削弱了草地植被类型及其部位对产流过程的影响。图 2 显示了裸坡、草被根系小区(苜蓿与黑麦草根系小区)及完整草被小区(苜蓿与黑麦草完整草被小区)在不同雨强下的平均径流率均值分别为 1.02 mm/min、0.89 mm/min 和 0.82 mm/min,因此,相较于裸坡对照,草被根系及完整草被的平均减流效益分别为 12.74%与 19.61%,则草被冠层的平均减流效益为 6.87%,表明草被根系的减流效益高于冠层。另外,苜蓿小区的平均径流率低于相同部位的黑麦草小区,其均值分别为 0.84 mm/min 与 0.92 mm/min,表明苜蓿的减流效益高于相同部位的黑麦草,苜蓿与黑麦草的平均减流效益分别为 17.65%与 9.80%。

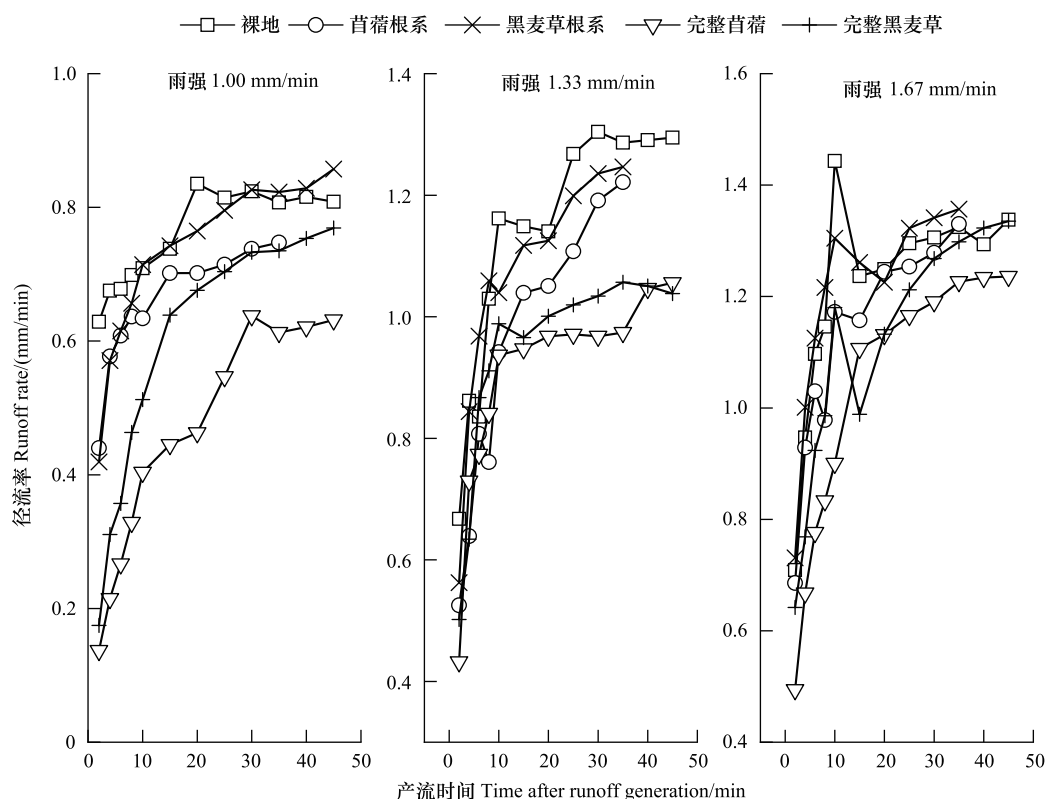


图 1 不同雨强下草地植被处理小区径流率变化过程

Fig.1 Runoff rate process on the bare slope and grassland vegetation treated plots under different rainfall intensities

2.1.2 地植被冠层与根系对坡面产沙过程的影响

不同雨强下草地植被小区土壤侵蚀率变化过程如图 3 所示。侵蚀产沙过程相较于产流过程较为复杂,波动起伏变化更加强烈,以裸坡侵蚀产沙过程的波动最为明显,侵蚀率也一直保持在较高水平。相同雨强下,草地植被小区的侵蚀产沙过程存在一定差异,完整草被小区的侵蚀率低于草被根系小区,且黑麦草小区的侵蚀率低于相同部位的苜蓿小区,但草地植被小区间侵蚀率变化过程的差异性随着雨强的增加明显减小,说明雨强的增加削减了草被类型及其部位对侵蚀产沙过程的调控作用。由图 2 可知,裸坡、草被根系小区及完整草被小区在不同雨强下的平均侵蚀率均值分别为 $0.83 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 、 $0.31 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 和 $0.24 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$,所以,与裸坡相比,草被根系及完整草被的平均减沙效益分别为 62.65%与 71.08%,则草被冠层的平均减沙效益为 8.43%,说明草被根系的减沙效益高于冠层。同时黑麦草小区的平均侵蚀率低于同部位的黑麦草小区,其均值分别为 $0.25 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ 和 $0.30 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$,可见黑麦草的减沙效益高于同部位的黑麦草,黑麦草与苜蓿的平均减沙效益分别为 69.88%和 63.86%。

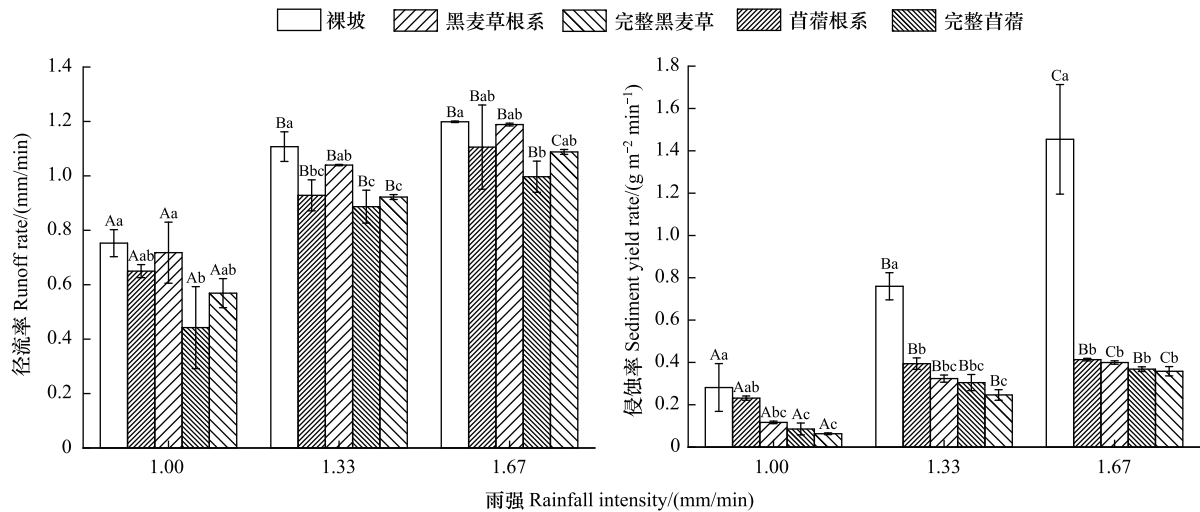


图2 不同雨强下草地植被处理小区平均径流率和平均侵蚀率

Fig.2 Average runoff rate and average sediment yield rate on the bare slope and grassland vegetation treated plots under different rainfall intensities

不同大写字母表示相同小区不同雨强间差异显著,不同小写字母表示相同雨强不同小区间差异显著($P<0.05$)

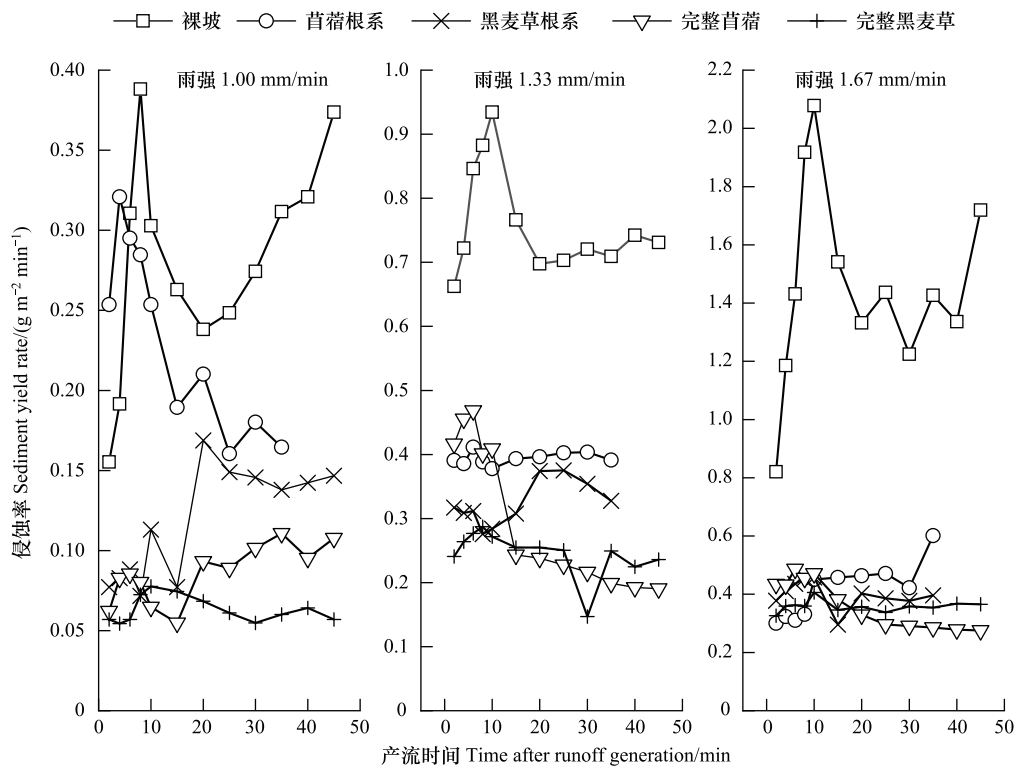


图3 不同雨强下草地植被处理小区侵蚀率变化过程

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

2.1.3 草地植被冠层与根系对减小坡面侵蚀的相对贡献

草地植被冠层与根系对坡面减流减沙的相对贡献如图4所示。在1.00mm/min雨强下,草被冠层减流的相对贡献高于根系,但随着雨强的增加,草被根系减流的相对贡献高于冠层。不同雨强下草被根系减流的平

均相对贡献高于冠层,且苜蓿根系减流的相对贡献高于黑麦草根系。苜蓿根系与黑麦草根系在不同雨强下的减流平均相对贡献分别为 75.45% 和 60.23%,相应的冠层减流平均相对贡献分别为 24.55% 和 39.77%。对于减沙效益而言,草被根系的相对贡献高于冠层,且雨强越大,草被根系减沙的相对贡献越大,同时黑麦草根系减沙的相对贡献高于苜蓿根系。苜蓿和黑麦草根系在不同雨强下的减沙平均相对贡献分别为 72.98% 和 85.57%,相应的冠层减沙平均相对贡献分别为 27.02% 和 14.43%。

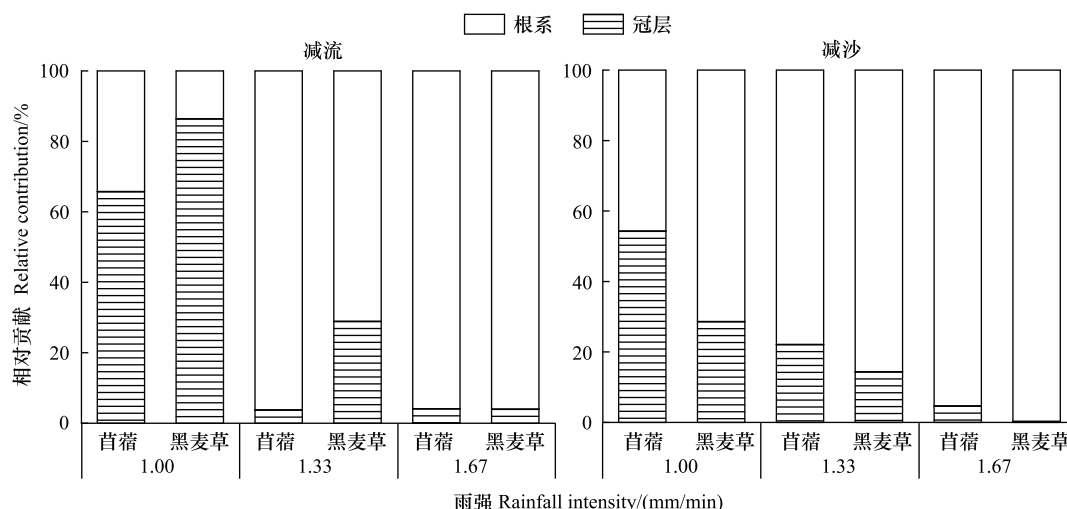


图 4 不同雨强下草地植被冠层与根系对减小坡面侵蚀的相对贡献

Fig.4 Relative contribution of canopy and root of grassland vegetation in runoff reduction and sediment yield reduction under different rainfall intensities

2.2 草地植被冠层与根系对坡面径流水动力学特征的影响

(1) 坡面径流流速: 坡面径流流速直接关系到坡面径流侵蚀过程, 是计算其它水动力学参数的基础。由图 5 所示, 裸坡在不同雨强下的径流流速显著大于草地植被小区, 同时草被根系小区的径流流速大于完整草被小区。裸坡、草被根系小区及完整草被小区在不同雨强下的径流流速均值分别为 0.124 m/s、0.089 m/s 和 0.062 m/s。因此, 相较于裸坡, 草被根系与完整草被作用下的径流流速分别减小了 28.2% 和 50.0%, 则草被冠层作用下的径流流速减小了 21.8%, 说明草被根系与冠层均具有减缓坡面径流流速的效益, 且草被根系的减速效益略大于草地冠层。此外, 黑麦草小区的径流流速小于相同部位的苜蓿小区, 其均值分别 0.071 m/s 与 0.080 m/s。随着雨强的增大, 各坡面小区的径流流速均呈现增加趋势。

(2) 坡面径流阻力特征: Darcy-Weisbach 阻力系数(f)作为计算水流沿程水头损失的参数, 适用于描述坡面层流的阻力特征。由图 5 可见, 裸坡的坡面 f 显著小于草地植被小区, 同时完整草被小区的坡面 f 大于草被根系小区。裸坡、草被根系小区、完整草被小区在不同雨强下的坡面 f 均值分别为 0.37、1.23、2.46。因此, 相较于裸坡, 草被根系和完整草被作用下的坡面 f 分别增加了 232.4% 与 564.9%, 则草被冠层作用下坡面 f 增加了 332.5%, 可见, 草被冠层增加坡面的阻力效益大于草被根系。另外, 黑麦草小区的坡面 f 大于相同部位的苜蓿小区, 其均值分别为 2.30 与 1.38。随着雨强的增大, 各坡面小区的 f 无明显变化。

(3) 坡面径流流态: 雷诺数(Re)和弗劳德数(Fr)作为反映水流紊动程度和急缓程度的流态参数, 能在很大程度上表征坡面流的水动力学特性。由图 5 可以看出, 不同雨强下各坡面小区的径流 Re 介于 12.70—39.78 之间, 且彼此间的径流 Re 差异不明显, 以 $Re=500$ 作为层流与紊流的判别界限, 试验中各坡面小区的径流均为层流。同时不同雨强下各坡面小区的径流 Fr 介于 0.03—0.08 之间, 根据明渠水流流态判别标准, 试验中所有坡面径流都为缓流。裸坡在不同雨强下的径流 Fr 大于草地植被小区, 且草被根系小区的径流 Fr 大于完整草被小区, 坡面径流 Fr 越大, 说明径流流速越大, 径流搬运泥沙的能力越强, 这表明草被冠层与根系均能

够削减坡面侵蚀动力,从而减小坡面径流侵蚀搬运泥沙的能力。此外,苜蓿小区的坡面径流 Fr 大于相同部位的黑麦草小区。随着雨强的增大,各坡面小区的径流 Fr 变化无差异。

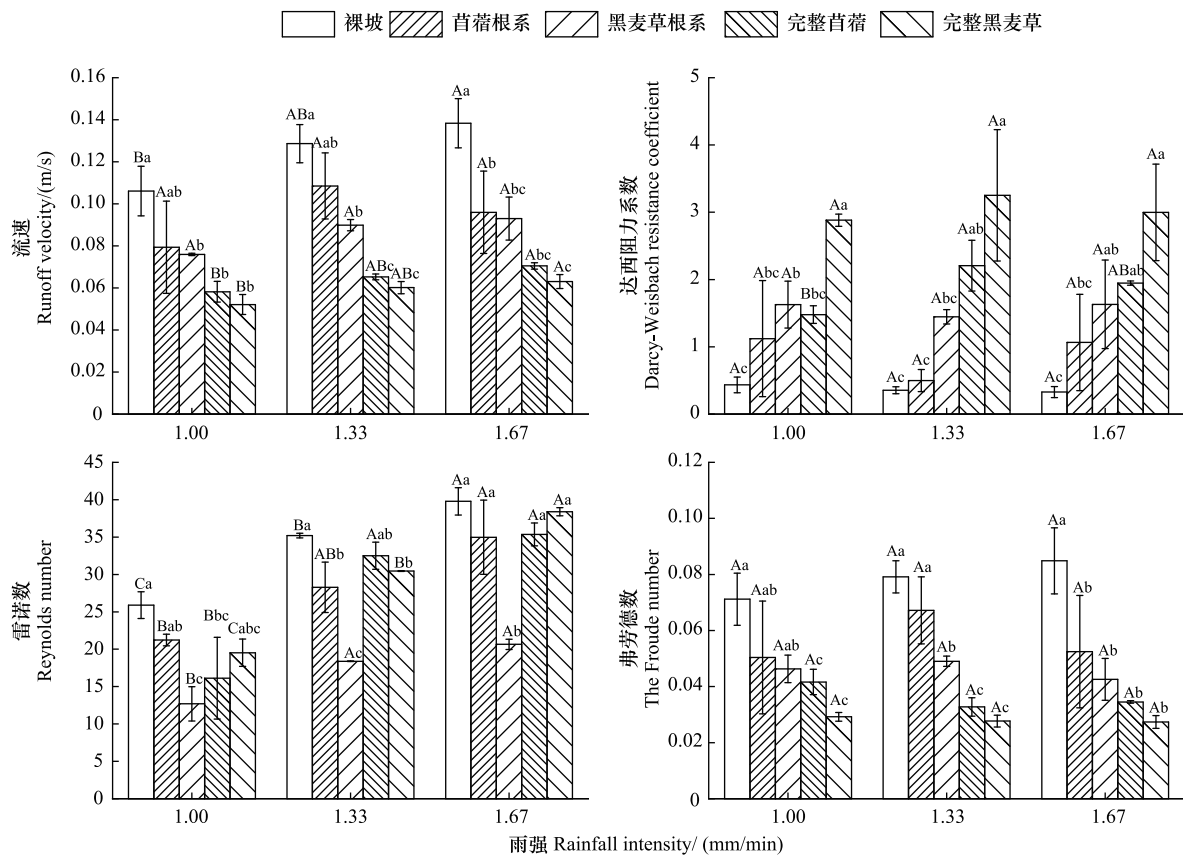


图5 不同雨强下草地植被处理小区坡面径流水动力学参数特征

Fig.5 Characteristics of hydrodynamic parameters of overland flow on the bare slope and grassland vegetation treated plots under different rainfall intensities

不同大写字母表示相同小区不同雨强间差异显著,不同小写字母表示相同雨强不同小区间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 草地植被对坡面土壤抗侵蚀能力特征的影响

本研究将各坡面小区侵蚀过程产生的侵蚀率与相应的水流切应力进行拟合(图6),结果表明,坡面侵蚀率与水流切应力的关系均可用幂函数方程较好地表示 ($P < 0.05$),拟合方程的 R^2 为 0.332—0.678。幂函数方程 $y = \alpha x^\beta$ 的系数 α 可以解释为单位侵蚀动力所引起的土壤侵蚀模数,可作为反映土壤抗侵蚀能力的指标,其值越小,即单位侵蚀动力所引起的侵蚀模数越小,则土壤抗侵蚀能力越强;反之则越弱^[18]。由图6可知,对比各坡面小区的系数 α 表明,裸坡、草被根系小区及完整草被小区的系数 α 平均值分别为 1.877、0.267 和 0.222。因此,草被根系小区和完整草被小区的系数 α 相较于裸坡分别减少了 85.8% 和 88.2%,可见,草被根系增强土壤抗侵蚀能力作用显著,而草被冠层的相对作用较小(仅为 2.4%),草冠并不对土壤抗侵蚀能力起直接作用,其主要通过消减雨滴动能及增加地表糙度的方式间接增强土壤抗侵蚀能力。此外,黑麦草小区与苜蓿小区的系数 α 平均值分别为 0.127 和 0.362,两者相较于裸坡分别减小了 93.2% 和 80.7%,表明黑麦草增强土壤抗侵蚀能力高于苜蓿。

植物根系强化土壤抗侵蚀能力是通过根系生长驱动土壤性质变化和根系对土体的绕缠固结两个方面的共同作用实现的。分析发现,与裸坡相比(表1),草地植被小区的土壤容重显著降低,而土壤有机质、土壤孔隙度、饱和导水率、团聚体平均重量直径及抗剪强度等均明显增加,这表明,相较于裸坡而言,草地植被小区显著改善了表层土壤结构的稳定性及入渗特征,从而增强了其抵抗径流侵蚀的能力。与此同时,黑麦草小区的

表层土壤理化及力学性质总体上优于苜蓿小区。另外,两种草地植被小区在盖度相近的情况下(表2),根系参数具有明显差异,黑麦草小区的根质量密度显著低于苜蓿小区,但其根长密度、根表面积密度及根体积密度等根系形态参数却显著高于苜蓿小区,这是由于两者的根系类型不同所致,相比于直根系的苜蓿,须根系的黑麦草具有发达的细根结构,能更有效地固结土壤,改善土体构型,从而增强了表层土壤的抗侵蚀能力。

表1 裸坡及草地植被小区表层土壤性质(0—10 cm)

Table 1 The soil properties of the topsoil layer for bare slope and grassland vegetation plots (0—10 cm)

地面覆盖 Ground cover	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	土壤孔隙度 Soil porosity/%	抗剪强度 Shear strength/kPa	平均重量直径 Mean weight diameter/mm	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/ (mm/min)	有机质 Soil organic matter/(g/kg)
裸坡 Bare slope	1.22a	48.18b	18.15b	0.20c	0.035a	1.68a
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	1.18c	48.62b	23.03a	0.22b	0.128b	3.62b
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	1.20b	49.30ab	19.11b	0.25a	0.129b	2.54c

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2 草地植被小区地上及地下部分植被参数

Table 2 Vegetation parameters of aboveground and underground part of grassland vegetation plots

植被类型 Vegetation type	地上冠层部分 Aboveground part			地下根系部分 Underground part			
	株高 Height/cm	盖度 Coverage/%	生物量 Biomass/ (g/m ²)	根长密度 Root length density/ (cm/cm ³)	根表面积密度 Root surface area density/ (cm ² /cm ³)	根体积密度 Root volume density/ (cm ³ /cm ³)	根质量密度 Root mass density/ (g/cm ³)
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	17.2a	56.1a	96.51a	2.24a	0.76a	0.02a	0.02a
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	24.1b	59.2a	110.59b	0.85b	0.30b	0.01b	0.03b

同一列不同小写字母表示不同植被类型间差异显著($P<0.05$)

3 讨论

3.1 草地植被冠层与根系对坡面侵蚀过程的影响

本研究表明,与裸地相比,苜蓿与黑麦草平均减流效益分别为17.65%和9.80%,减沙效益分别为63.86%和69.88%。相比于减流效益,两种草地植被的减沙效益更显著。这是由于草被冠层的截雨量较小,且每场降雨试验之前,裸坡及草地植被的土壤水分基本均达到饱和和状态,这在很大程度上削弱了草地植被与裸坡间产流能力的差异,从而减小草地植被的减流效益。另外,不同雨强条件下草被根系减流的平均相对贡献高于冠层,同时苜蓿根系减流的相对贡献高于黑麦草根系(图4),这与之前的研究结果有所不同^[19]。以往的研究表明草灌植被冠层在减少地表径流中往往较根系的作用大。究其原因,主要是因为本研究中的草冠本身的蓄水能力较弱,加之每次试验之前的预降雨处理,使得冠层在降雨过程中无法拦蓄较多的降雨,其延缓径流的能力也大幅减小,而草被根系在生长过程中改善了表层土壤结构,增强了土壤入渗能力(表1),因而与冠层相比表现出较大的减流贡献率,这与Wei等^[5]的研究结论一致。与黑麦草根系相比,苜蓿根系较粗,这些较粗的根系在生

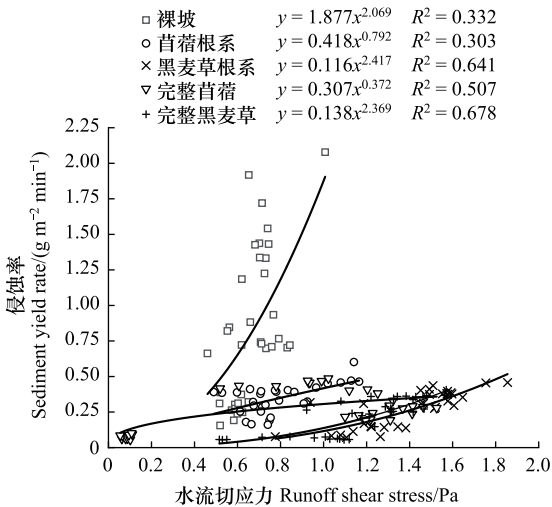


图6 草地植被处理小区坡面土壤侵蚀率对水流切应力的响应
Fig.6 Response of sediment yield rate to runoff shear stress on the bare slope and grassland vegetation treated plots

长过程中穿插土壤,一部分根系死后,形成了比较大的根孔,极大地促进了降雨的入渗,因此苜蓿根系表现出较大的减流贡献率。对于减沙效益而言,草被根系减沙的相对贡献高于冠层,且雨强越大,草被根系减沙的相对贡献越大,同时黑麦草根系减沙的相对贡献高于苜蓿根系(图4),这与以往的研究结果相似^[11]。Zhao等^[12]通过室内模拟降雨试验发现黄土高原水蚀风蚀交错区沙打旺根系的减沙效益大于冠层,特别在高强度降雨下,根系减沙效益更为显著。赵炯昌等^[4]利用野外模拟降雨试验发现黄土丘陵沟壑区3种典型灌草(沙棘、柠条、苜蓿)根系较地上部分发挥了较大的减沙作用,平均相对贡献为78%。Li等^[6]同样采用野外模拟降雨试验也发现北方黄土丘陵区3种牧草(沙打旺、苜蓿、大波斯菊)根系在减少土壤侵蚀中起主导作用,平均贡献率为84%。草被根系通过对土壤颗粒的绕缠固结作用,促进了土壤团聚体的形成和土壤抗侵蚀能力的增强,因此,当剪除草被冠层后,坡面侵蚀产沙量并不比有冠层覆盖时增加太多,从而表现出较大的根系减沙贡献率,同时根系坡面的侵蚀产沙量在雨强增加时也不会明显增加,相反,裸坡随着雨强的增加容易产生较大的侵蚀产沙量,从而呈现出根系减沙贡献率随着雨强的增加而增大的特征。此外,黑麦草根系较苜蓿根系减沙的相对贡献高,这主要是由于两者的根系类型不同所致。黑麦草根系类型为须根系,其抑制土壤侵蚀过程的效应往往优于直根系的苜蓿。由此可知,草被根系对控制土壤侵蚀起主导作用,且以须根系的草被控制侵蚀效果最佳,这表明在草地管护具体措施中诸如收割地上牧草喂养牲畜的行为并不会对其控制土壤侵蚀的能力产生较大影响。

3.2 草地植被冠层与根系对坡面径流水动力学特征的影响

坡面径流水动力学特征决定着坡面径流的动力强弱从而控制着侵蚀过程及其速率大小。草地植被对坡面径流水动力学特征的影响主要表现在其对坡面径流流速、流态和坡面阻力的影响。本研究表明,草被根系和冠层能够减小坡面径流流速和增加坡面阻力系数,并在一定程度上减缓坡面径流流态,各坡面的径流流态均为层流-缓流,这与前人的研究结果基本相似^[14, 20]。赵春红等^[21]研究牧草调控绵沙黄土坡面侵蚀过程试验表明沙打旺根系和冠层对减小坡面径流流速和增加坡面阻力具有显著的作用,且根系的减速效益大于冠层,但其增阻效益小于冠层。张思毅等^[22]在研究草被不同部位对坡面径流水动力学参数的影响时指出白三叶根系与冠层具有明显的减速增阻效益,其中冠层的减速增阻效益远大于根系。本研究中相较于裸坡,草被根系与冠层作用下的坡面平均径流流速分别减小了28.2%和21.8%,相应的坡面阻力系数分别增加了232.4%和332.5%,草被根系的减速作用略大于冠层,但其增阻作用却小于冠层,其原因是由于立地条件的限制导致试验土槽中生长的草被地上冠层较为稀疏,覆盖度相对较低,而表层土壤水分充足使得草被根系趋向于地表生长,这种现象在黑麦草小区中最为明显,从而表现为草被根系的减速作用大于冠层。草被根系的增阻作用小于冠层,其原因是冠层较根系而言直接覆盖于地表,大大增加了坡面的形态阻力,甚至是波阻力,而根系主要分布在地下,其通过增加土壤团聚体颗粒从而提高了坡面颗粒阻力,但这种作用有限^[21]。此外,黑麦草根系与冠层的减速增阻效益大于相同部位的苜蓿,这是因为相比于直根系苜蓿而言,须根系黑麦草表层细根特别发达,并且在地表发育了许多气生根,同时黑麦草分蘖后在地面以下或接近地面处形成了簇状的植物茎秆,共同作用下使得黑麦草分散、阻碍地表径流的能力大大增强。总之,草被由于地上冠层(茎叶、植物茎秆)与根系的存在,增加了坡面径流阻力,减小了坡面径流流速,进而消耗了径流侵蚀能量,发挥了调控坡面侵蚀的作用,其对坡面径流水动力学参数的影响与其形态特征、密度大小及其排列方式等密切相关^[23-24]。

3.3 草地植被对坡面土壤抗侵蚀能力的影响

土壤对侵蚀的敏感性,即土壤可蚀性被定义为单位侵蚀外营力(如降雨击溅及径流冲刷)造成的土壤流失量^[25]。对于给定的土壤而言,土壤可蚀性越小,相应的土壤抗侵蚀能力越大。本研究中,坡面土壤侵蚀率与水流切应力之间的幂函数方程系数 α 可以解释为单位水流切应力所引起的土壤侵蚀模数,可作为反映土壤抗侵蚀能力的指标。相比于裸坡,草被根系小区与完整草被小区的系数 α 分别减小了85.8%和88.2%,可见草地植被主要通过根系来增强土壤抗侵蚀能力(冠层的相对作用仅为2.4%),这与之前的研究结论基本一致^[5, 12]。与此同时,与裸地相比,草地植被小区的表层土壤理化及力学性质明显改善(表1)。研究表明,伴随

着植物根系生长,通过根系的穿插挤压和根系周转活动,改善了土壤性质(如促进土壤水稳性团聚体的形成,提高团聚体稳定性,增加土壤粘聚力,提升土壤抗剪强度等),从而增强了土壤抗侵蚀能力^[26-28]。这也正是本研究中草地植被土壤抗侵蚀能力随着表层土壤性质的改善而增强的原因所在。另外,黑麦草小区的系数 α 均值(0.127)明显小于苜蓿小区(0.362),说明黑麦草对土壤抗侵蚀能力的增强效应大于苜蓿,这是由于两者的根系类型不同所致(表2),须根系的黑麦草较直根系的苜蓿能更有效地固结土壤,改善土壤结构,从而增强土壤的抗侵蚀能力,这在以往的研究中已被大量证实^[29-30]。草本植物根系抑制土壤侵蚀的能力受根系类型的影响,须根系草本在提高土壤抗侵蚀性能方面较直根系草本作用显著,这是由于须根系草本存在大量的细根(特别是<1 mm的细根),能形成致密的根系网络固结土体,同时大量的根系分泌物可以通过分子键力将土壤颗粒吸附在根际周边,增加了土壤颗粒被分散的难度,从而提高了土壤抗侵蚀能力。

草地植被在干旱半干旱黄土区的水土流失生态治理中发挥着不可替代的作用。草地植被调控坡面侵蚀过程是地上部分与根系同时影响、协同作用的结果。本研究采用剪除草被地上部分直接对比的方法,研究了草被冠层与根系对坡面侵蚀过程的影响,而针对草被地上部分与根系调控土壤侵蚀的协同效应有待进一步研究。另外,今后研究中可结合植物茎秆、枯落物、生物结皮等近地表组分变化对坡面侵蚀过程的影响及其机制。

4 结论

本文采用人工模拟降雨方法,对比分析了不同雨强下两种草地植被类型及其冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程、径流水动力学特性及土壤抗侵蚀能力特征的影响,主要结论如下:

(1)与裸地相比,苜蓿与黑麦草的平均减流效益分别为17.65%和9.80%,减沙效益分别为63.86%和69.88%。不同雨强下草被根系减流减沙的平均相对贡献高于冠层,且雨强越大,草被根系减沙的相对贡献也越大。苜蓿根系减流的相对贡献高于黑麦草根系,其减流相对贡献分别为75.45%和60.23%,但其减沙的相对贡献却低于黑麦草根系,相应的减沙相对贡献分别为72.98%和85.57%。

(2)草地植被对坡面侵蚀动力的调控主要通过削减坡面径流流速和增加坡面阻力的方式实现,草被根系对坡面径流的减速作用略大于冠层,根系与冠层对坡面径流的减速效益分别为28.2%和21.8%,但草被根系对增加坡面径流阻力的作用则明显小于冠层,两者对坡面径流的增阻效益分别232.4%和332.5%。黑麦草冠层与根系的减速增阻效益均大于同部位的苜蓿。

(3)坡面土壤侵蚀率与水流切应力关系可用幂函数 $y = \alpha x^\beta$ 较好地拟合。幂函数的系数 α 可以解释为单位水流切应力所引起的土壤侵蚀模数,可作为反映土壤抗侵蚀能力的指标。草被根系与冠层作用下的系数 α 相较于裸坡分别减小了85.8%和2.4%,表明草被根系增强土壤抗侵蚀能力作用显著,这主要归因于草被根系结构对表层土壤理化及力学性质的改善,从而增强了其抵抗径流侵蚀的能力。黑麦草与苜蓿作用下的系数 α 较裸坡分别减小了93.2%和80.7%,表明黑麦草增强土壤抗侵蚀能力高于苜蓿,这是由于相较于直根系苜蓿,须根系黑麦草具有发达的细根结构,表层土壤性质明显改善,从而增强了其抵抗土壤侵蚀的能力。

参考文献(References):

- [1] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展.地理科学,2003,23(2):230-235.
- [2] 史志华,宋长青.土壤水蚀过程研究回顾.水土保持学报,2016,30(5):1-10.
- [3] 肖培青,姚文艺,申震洲,杨春霞.苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究.水利学报,2011,42(2):232-237.
- [4] 赵炯昌,卫伟,段兴武.模拟降雨下黄土坡面水沙过程对3种灌木植被垂直结构变化的响应.生态学报,2021,41(21):8602-8611.
- [5] Wei S, 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] 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.
- [7] 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.农业工程学报,2010,26(3):14-19.

- [8] 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.
- [9] 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 & Tillage Research, 2019, 195: 104420.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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 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.
- [18] Chen H, Zhang X P, Abia 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.
- [19] 邵奕铭, 高光耀, 刘见波, 傅伯杰. 自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应. 生态学报, 2022, 42(1): 322-331.
- [20] 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理. 水科学进展, 2007, 18(4): 490-495.
- [21] 赵春红, 高建恩, 徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理. 应用生态学报, 2013, 24(1): 113-121.
- [22] 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.
- [23] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 王俊杰. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性. 水科学进展, 2014, 25(6): 825-834.
- [24] Fu S H, Mu H L, Liu B Y, Yu X J, Zhang G H, Liu Y N. Effects on the plant stem arrangement on sediment transport capacity of croplands. Land Degradation & Development, 2020, 31(11): 1325-1334.
- [25] Bryan R B, Govers G, Poesen J. The concept of soil erodibility and some problems of assessment and application. Catena, 1989, 16(4/5): 393-412.
- [26] 谌芸, 何丙辉, 练彩霞, 刘志鹏, 彭石磊. 三峡库区陡坡根-土复合体抗冲性能. 生态学报, 2016, 36(16): 5173-5181.
- [27] Ye C, Guo Z L, Li Z X, Cai C F. The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China. Geomorphology, 2017, 285: 82-93.
- [28] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267-273, 298.
- [29] 张光辉 等. 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: 273-275.
- [30] 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.