

黄土丘陵沟壑区切沟形态特征对典型 草本根系类型与密度的响应

王健衡^{1,2}, 李成奥^{1,2}, 杨 扬^{1,2}, 刘瑛娜¹

(1.北京师范大学地理科学学部地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室,北京 100875;

2.北京师范大学地理科学学部地理学院,北京 100875)

摘 要: [目的] 研究草本根系类型与密度对切沟侵蚀的定量影响,对于深入理解植物根系调控切沟侵蚀的作用机理具有重要意义。[方法] 选取黄土丘陵沟壑区典型坡面,种植直根系(紫花苜蓿)和须根系(无芒雀麦)草本植物,通过设置不同种植行距模拟根系密度梯度,以裸地为对照,开展野外放水冲刷试验,利用运动恢复结构摄影测量法获取试验前、后的地表DEM,分析根系类型与密度对切沟侵蚀及切沟主要形态参数的影响。[结果] 1) 在同一种植行距条件下,相比直根系处理,须根系处理的切沟规模明显较小,其切沟周长、面积和体积仅分别为前者的28%、13%和6%,沟道形态较复杂、破碎。2) 除周长和宽深比外,各切沟形态参数均与根重密度显著相关($p < 0.05$)。随着根重密度的增大,切沟长度、最大表面宽度、最大和平均深度线性减小,减小速率为 $0.40 \sim 9.35 \text{ m}^2/\text{kg}$;切沟平均表面宽度、面积和体积呈指数下降趋势,对应的指数系数分别为 -1.83 、 -3.76 和 -5.48 ;切沟周长-面积比呈指数上升趋势,指数系数为 2.04 ;切沟宽深比则呈先增后减趋势,在根重密度 $0.23 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时达到最大。[结论] 提高草本植物尤其是须根系植物的根系密度,可有效遏制切沟扩张。研究结果可为黄土丘陵沟壑区的切沟侵蚀防控提供科学依据。

关键词: 切沟侵蚀; 根系类型; 根系密度; 切沟形态特征; 野外原位冲刷试验; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0264-11

Responses of Gully Morphological Characteristics to Typical Herbaceous Root Type and Density in the Loess Hilly-Gully Region

WANG Jianheng^{1,2}, LI Cheng'ao^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, LIU Yingna¹

(1.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Disaster Risk Reduction, Faculty of Geographical Science,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.School of Geography, Faculty of

Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] Plant roots can enhance rainwater infiltration, improve soil erosion resistance, thereby effectively control soil erosion. However, few attempts have been made so far to examine the influence of plant roots on gully erosion. The objective of the current study was to systematically evaluate the impact of herbaceous root type and density on gully erosion and gully morphology. [Methods] Typical slopes with consistent slope gradient of 25° were selected in the loess hilly-gully region, on which a total of 16 runoff plots were established, i. e., each with a length of 8 m and a width of 0.7 m. Among these plots, 3 were kept fallow as the contrast (CK), 3 were grown with the taproot grass alfalfa (*Medicago sativa* L.) in a typical row spacing of 15 cm (TR15). Whereas in the remaining 10 plots, the awnless brome (*Bromus inermis* Leyss.) with fibrous root systems (FR) were planted with five different row spacings, i. e., 10, 15, 20, 25 and 30 cm, to simulate varying root densities. On each plot, a field *in situ* scouring experiments was performed at a constant flow rate of 1.5 L/s for 90 min. The

收稿日期: 2025-08-13

修回日期: 2025-09-20

录用日期: 2025-09-29

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(42130701)

第一作者: 王健衡(2000—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: 202321051019@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 杨扬(1987—),女,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: yang.yang@bnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

Structure from Motion (SfM) photogrammetry was employed to acquire the digital orthophoto maps (DOMs) and digital elevation models (DEMs) before and after the scouring experiment, which were later used to estimate gully erosion volume and to extract a total of 10 gully morphological parameters, i. e., length, maximum and mean surface widths, maximum and mean depths, perimeter, area, volume, width-depth ratio and perimeter-area ratio. Soil samples were also collected before the scouring experiment to measure root mass density (RMD) of four different soil layers, i. e., 0–10 cm, 10–20 cm, 20–40 cm, and 40–60 cm. [Results] The results revealed stronger containing effects on gully erosion by the fibrous root system compared to the taproot one. Grown with the same row spacing of 15 cm, the gully erosion volume and gully size in the runoff plots with the fibrous root grass (FR15) were apparently smaller than those in TR15. The perimeter, area and volume of the gullies measured in FR15 were only 28%, 13%, and 6% of those in TR15, respectively. In addition, the perimeter-area ratios reflecting the complexity of the gully shape were remarkably higher in FR15 than in TR15, indicating more complex and fragmented gullies in the fibrous root treatments. Gully morphology was also significantly affected by root density. Except for perimeter and width-depth ratio, all the gully morphological parameters investigated were found to be significantly correlated with RMD of one soil layer at least ($p < 0.05$), according to the Pearson's correlation analysis. Moreover, only the perimeter-area ratio was significantly positively associated with RMD; while the other interactions, if significant, were all negative. Using regression analysis, the gully length, maximum surface width, maximum and mean depth were found to decrease linearly with RMD at the rates between 0.40–9.35 m²/kg. Whereas with increasing RMD, the mean surface width, area and volume decreased exponentially, and the corresponding exponential coefficients were –1.83, –3.76, and –5.48, respectively. In contrast, the perimeter-area ratio increased exponentially with RMD, and the corresponding exponential coefficient was 2.04. The width-depth ratio exhibited an increasing-then-decreasing trend overall when RMD increased. According to the quadratic function used to fit their relationship, the width-depth ratio reached the maximum when RMD was approximately 0.23 kg/m³. [Conclusion] It is implied that increasing the root density of herbaceous plants, especially those with the fibrous root systems, can effectively contain gully erosion. These findings can provide a valuable reference for gully erosion control in the loess hilly-gully region.

Keywords: gully erosion; root type; root density; gully morphological characteristics; field *in situ* scouring experiment; loess hilly-gully region

Received: 2025-08-13

Revised: 2025-09-20

Accepted: 2025-09-29

Online(www.cnki.net): 2025-12-19

切沟侵蚀不仅可直接降低土壤肥力,造成作物产量下降,而且还使土地变得支离破碎,大幅增加农业生产成本^[1]。黄土高原是我国切沟侵蚀最严重的地区,且以黄土丘陵沟壑区尤为剧烈^[2]。为从根本上遏制土壤侵蚀,我国于1999年起在黄土高原实施了大规模的退耕还林(草)工程,区域植被迅速恢复,土壤侵蚀速率显著下降。然而,目前关于植被恢复对黄土高原土壤侵蚀影响的研究主要集中在细沟和细沟间侵蚀,对切沟侵蚀关注较少^[1]。

植物地上和地下部位均具有遏制水土流失的功能^[3]。地上部分多通过降雨截留和降低雨滴动能削弱溅蚀和细沟间侵蚀^[4];地下根系不仅可促进降水入渗,还可通过固结缠绕、吸附牵拉等方式增强土壤团聚作用、提高土壤抗蚀性能^[5],进而有效遏制细沟和切沟侵蚀。草本植物根据其根系形态和结构,可分

为直根系和须根系两大类。前者的主根粗大且长、侧根较短细;后者的根系无主次之分、总体呈须状^[6]。大量细沟和细沟间侵蚀研究^[5,7-8]表明,须根系较直根系具有更强的固土减蚀作用。然而,根系类型对切沟形态特征及其演变的影响研究仍相对匮乏。植物根系的减蚀效应还与其密度有关。一般而言,根系密度越大,土壤临界剪切力越大,土壤分离能力和细沟可蚀性越小^[8]。

对于切沟侵蚀,GUO等^[9]结合人工模拟降雨和放水冲刷试验发现,切沟沟头溯源距离和切沟面积均随根重密度增加呈显著下降趋势。然而,冯兰茜等^[10]试验结果表明,随着根重密度增大,切沟面积逐渐减小,但沟头溯源距离并未显著降低。可见,关于根系密度对切沟侵蚀的影响尚未取得一致结论,亟须开展系统研究。

切沟几何形态可直观反映切沟侵蚀的严重程度^[11],其准确刻画是开展切沟侵蚀研究的重要基础。相比测针法、断面测量法和 GPS 法等接触式测量方法以及遥感解译法、激光扫描法等非接触式测量方法,运动恢复结构(structure from motion, SfM)摄影测量方法因其具有成本低、精度高和操作简单等优势,近年来在土壤侵蚀研究中的应用日益广泛^[12]。为系统探究根系类型与密度对切沟形态特征的影响,本研究在黄土丘陵沟壑区选取典型坡面,种植当地典型的直根系和须根系草本植物,并通过设置不同种植行距模拟根系密度梯度,开展野外放水冲刷试验,利用 SfM 摄影测量法获取试验前、后的地表 DEM,分析根系类型与密度对切沟主要形态参数的定量影响,以期加深对植物根系调控切沟侵蚀作用机理的理解,为黄土丘陵沟壑区的切沟侵蚀防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外试验在陕西省延安市安塞水土保持综合试验站山地试验场(36°51'18"N, 109°18'59"E)进行。该区地处黄土高原腹地,属黄土丘陵沟壑区,境内沟壑纵横,水土流失严重。气候类型为暖温带半湿润半干旱气候,多年平均气温 8.8℃,多年平均降水量约 500 mm,一般集中在 6—9 月,以短历时、高强度暴雨为主^[13]。植被类型为暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原,草本植物以豆科、禾本科和菊科为主^[13]。土壤类型主要为黄绵土,质地均一,疏松多孔,且有机质和黏粒质量分数较低,胶结能力弱,遇水易分散,抗蚀能力差。

1.2 野外原位冲刷试验

2022 年秋季,在试验场选择 3 个规格一致(坡度 25°,长 20 m×宽 4 m)的坡面径流小区,其中 2 个小区为休闲裸地,1 个小区为自然草地。移除小区原有植物,并定期除草、翻耕,消除对既往条件的影响。经英国 Malvern Mastersizer 3 000 激光粒度分析仪测定,3 个小区的土壤砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)平均质量分数分别为 38.73%、58.47% 和 2.80%,土壤质地类型为粉壤土。2023 年 4 月,在 3 个径流小区内随机布设 16 块长 8.0 m、宽 0.7 m 的样地。根据当地的农事习惯,牧草多采用条播方式种植,行距多为 15~30 cm。因此,其中 3 块样地按照 15 cm 行距种植豆科植物紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)。10 块样地按照不同行距种植禾本科植物无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss.)。为探究较小行距条件下的根系特征及其对切沟侵蚀的影

响,除 15、20、25、30 cm 行距外,还布设 10 cm 行距处理,每个行距 2 个重复。种植 2 种牧草时,均确保每行播量一致。余下 3 块样地则定期除草、翻耕,维持休闲、裸露状态,作为裸地对照(CK)。为避免不同处理相互干扰,各样地两两之间及样地与坡面径流小区边界均设置缓冲区。紫花苜蓿和无芒雀麦分别为黄土丘陵沟壑区的典型直根系和须根系草本植物,为方便分析,将其对应小区按照根系类型+种植行距+重复次序的形式进行标记。例如,TR15 A 表示以 15 cm 行距种植直根系草本植物紫花苜蓿的第 1 个小区;FR10 B 表示以 10 cm 行距种植须根系草本植物无芒雀麦的第 2 个小区。裸地小区不涉及种植行距,利用 A、B、C 简单标记其 3 个重复。

2024 年 8—10 月,利用不锈钢板将各样地围建成冲刷试验小区,开展野外原位放水冲刷试验。为抑制小区内、外土壤水分交换,钢板插入深度均为 30 cm。试验供水系统由蓄水池、水泵、消防水带、水管、储水罐、溢流罐、控制阀门和稳流槽等组成。利用水泵和消防水带将储存在蓄水池中的试验用水输送至储水罐中,再通过水管输送至侧面开孔以维持水头稳定的溢流罐中。在溢流罐下方,利用阀门进一步调节放水流量;同时,在冲刷小区上方安装稳流槽,并在其下 50 cm 范围内铺设白棉布,确保试验用水可平稳流入冲刷小区中。本研究重点关注植物根系对切沟发育的影响,因此,在冲刷试验开始前,小心剪除草本植物地上部分的茎叶并清除枯落物,仅保留根系。为实现坡面单条侵蚀沟发育情况的连续观测,并确保试验初始条件一致,参考黄土丘陵沟壑区野外细沟的形态特征^[14],在每次冲刷试验开始前,使用浅“V”形木质刮板在小区中央制作宽度 15 cm、深度 5 cm 的锥形沟模型^[15],从小区顶端一直延伸至小区末端。

基于黄土高原典型降雨事件的产流情况^[16],并参考黄土高原相关冲刷试验结果^[17-18],将放水流量设计为 1.5 L/s,冲刷持续时间 1.5 h。为确保各处理的前期含水量基本一致,冲刷试验开始前,使用电动喷雾器洒水润湿地表。正式放水试验前,对放水流量进行人工率定,当实际流量与设计流量的相对误差<5%且基本稳定后,将放水管置于稳流槽内,并于径流流出稳流槽口时开始计时。在各小区冲刷前、后,利用 SfM 摄影测量法分别测量小区地表 DEM,在此基础上分析土壤侵蚀空间分布并提取切沟主要形态参数。

1.3 坡面切沟测定与形态参数提取

冲刷试验开始前,在各小区边壁以约 50 cm 间距布设控制点共计 46 个,将小区左下角设置为坐标原点(0,0,0),并使用精度为 1 mm 的直角尺测量各控

制点的相对坐标。每次放水冲刷前、后,利用 Canon EOS 70 D 单反相机从不同角度对小区进行拍摄,相机焦距设置为 18 mm 且固定不变,对焦模式为自动对焦。拍摄过程中,确保相邻照片的重叠率 $>60\%$,同时保证拍摄光线均一、下垫面无积水,每个小区拍摄照片 200~500 张。将所摄照片导入 Agisoft Metashape Professional 1.5.2 软件中,评估照片质量并剔除清晰度不足的照片,随后依次生成稀疏点云、稠密点云和 1 mm $\times$ 1 mm 分辨率的 DEM 和数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)。

由于拍摄照片的匹配偏差及插值方法本身误差等,SfM 所测 DEM 存在不确定性。为尽可能准确反映放水冲刷导致的地表高程变化,重复进行光束法平差,生成一系列稀疏点云和 DEM,并将该结果导入 SfM_georef 软件中,计算各像元高程的标准差^[19]。对于任意小区,结合其冲刷前、后各像元高程的标准差,计算其检测限(level of detection, LoD):

$$\text{LoD} = 1.96 \times \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_a^2} \quad (1)$$

式中:1.96 为置信区间为 95% 时的 t 分布取值; σ_b 和 σ_a 分别为冲刷前、后的像元高程标准差,mm。将 LoD 导入 ArcGIS Pro 3.0 软件中,并与小区冲刷前、后的原始 DEM 差值(DEM of difference, DoD)进行比较。若像元 DoD 绝对值小于对应 LoD,说明该像元高程并未发生显著变化,将其 DoD 赋值为 0。若像元 DoD 绝对值大于 LoD,高程变化显著,正值表示出现泥沙堆积,负值说明发生土壤净侵蚀。将各小区冲刷试验前、后的像元 DoD 累加后乘以像元面积,即可得到小区总侵蚀体积。

结合 DEM、DOM 与局部坡度变化,利用 ArcGIS Pro 3.0 软件勾绘各小区发育切沟的边界,并基于切沟范围内的 DoD 计算切沟侵蚀体积。同时,利用冲刷试验后的各小区 DEM,提取切沟长度、最大和平均表面宽度、最大和平均深度、周长、面积、体积、宽深比和周长-面积比共计 10 个形态参数。其中,切沟长度是指从沟头至沟尾的沟底线长度。切沟宽度和深度参数均基于切沟横断面获得。从沟头开始,沿沟底线每隔 5 cm 提取沟道横断面,随后利用 ArcGIS Pro 3.0 软件中的测量工具获取各断面的表面宽度和深度,再统计得到各切沟的最大和平均表面宽度、最大和平均深度。将切沟平均表面宽度除以平均深度,即可得到切沟宽深比。切沟周长指切沟沟缘线长度;面积指切沟沟缘线范围内的投影面积;周长-面积比指切沟周长与面积的比值;体积指基于切沟沟缘线生成沟缘面后,与切沟内表面围成的封闭区域的体积。若单个小区有多条切沟发育,则计算各切沟形态参数的平均值,反映该小区的切沟总体发育状况。

1.4 土壤样品采集与分析

冲刷试验前,清理各小区对应缓冲区内的枯落物,并小心剪除植物地上部分,随后使用直径 8 cm 的根钻在缓冲区坡上、坡中和坡下部位分别采集植株生长行上和行间 0~10、10~20、20~40、40~60 cm 深度的土壤样品。将样品带回实验室后置于网筛上,利用低压水流将根系上粘连的土壤去除后,以 65℃ 烘干至恒重,并据此计算根重密度(root mass density, RMD):

$$\text{RMD} = \frac{M}{V} \times 1000 \quad (2)$$

式中:RMD 为根重密度,kg/m³;M 为根系烘干质量,g;V 为取样体积,cm³;1 000 为单位转换系数。对于各土层深度,均计算行上和行间所测根重密度均值,反映其根系的总体分布状况。

1.5 数据分析

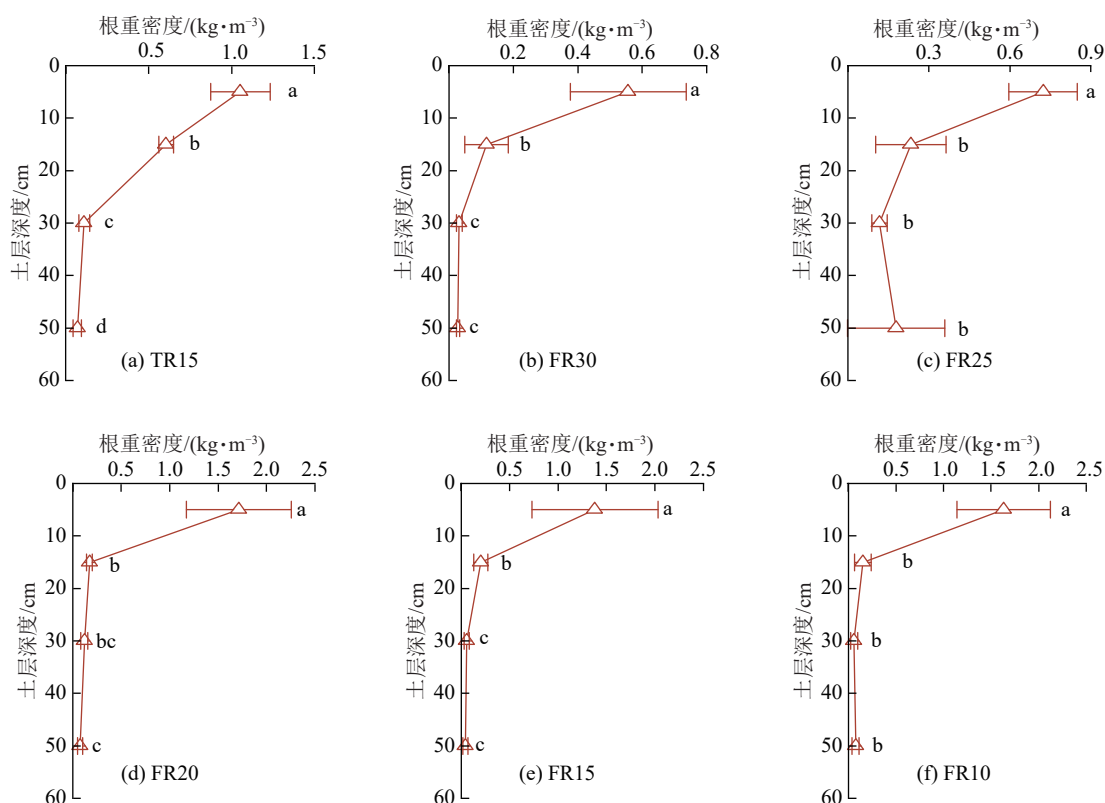
采用单因素方差分析(ANOVA)检验不同处理间根重密度的差异显著性。使用 Pearson 相关分析量化各切沟形态参数与不同土层根重密度之间的相关关系;利用回归分析中的曲线估算工具构建切沟形态参数与根重密度之间的函数关系。上述统计分析均利用 IBM SPSS 26 软件完成,差异显著性水平设置为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同处理的根重密度对比

对于同一土层,各处理坡上、坡中和坡下所测根重密度均无显著差异。因此,计算各处理 3 个坡位的根重密度平均值,并将其随土层深度的变化绘制见图 1。从垂直分布来看,紫花苜蓿小区(TR15)的根重密度随土层加深呈显著递减趋势(图 1a)。对于须根系植物无芒雀麦,尽管 0~10 cm 土层的根重密度显著较高,但其余土层两两之间并无显著差异(图 1c、图 1f),或仅个别土层之间存在显著差异(图 1b、图 1d~图 1e)。

对比不同处理的根重密度发现,根系类型的影响主要体现在 10~20 cm 土层上。在同样的种植行距条件下,TR15 在 10~20 cm 土层的根重密度显著高于 FR15(图 2)。种植行距对根系密度的影响则主要体现在 0~10、20~40 cm 土层上。同为无芒雀麦,在 0~10 cm 土层,根重密度随种植行距缩小总体增大;但当种植行距 ≤ 20 cm 时,根重密度基本稳定。在 20~40 cm 土层,FR30 的根重密度显著小于 FR25 和 FR20,但与 FR15 及 FR10 并无显著差异。在 10~20、40~60 cm 土层,无芒雀麦各处理的根重密度并无显著差异。



注:图中不同字母表示不同土层深度根重密度存在显著差异($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同处理根重密度随土层深度的变化

Fig. 1 Changes in root mass density with soil depth in different treatments

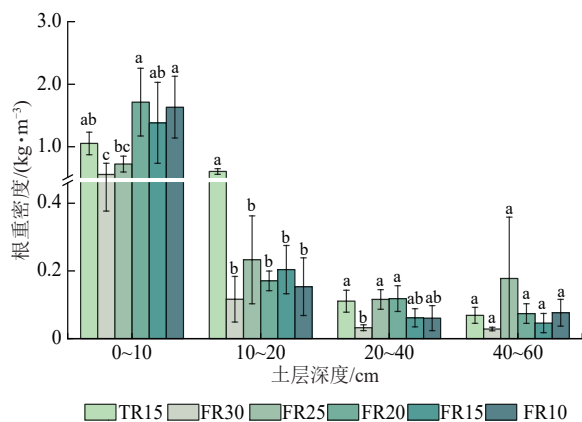


图 2 不同处理各土层根重密度对比

Fig. 2 Comparison of root mass density of each soil layer among different treatments

2.2 不同处理小区的土壤侵蚀空间分布

冲刷试验期间,各处理均发生明显侵蚀(图 3),且均发育有最大深度超过 30 cm 的沟道,可切破黄土区犁底层^[20],满足关于切沟深度的一般规定^[21]。总体上,除 FR10B 外,侵蚀沟道及侵蚀较严重的区域主要分布在坡脚或放水出流的稳流槽下方。基于各小区冲刷试验前、后 DEM 及其差值(DoD),计算总侵蚀体积和切沟侵蚀体积(图 4)。其中,FR25B 在冲刷试验伊始,下切沟道便因串联地下鼠洞致来水外流,

侵蚀沟提前中止发育,沟道规模总体较小,因而并未纳入土壤侵蚀空间分布及后续切沟形态特征分析。对于总侵蚀体积,直根系紫花苜蓿小区(TR15)与 CK 较接近,2 种处理的平均侵蚀体积分别为 0.35, 0.39 m³。在相同的种植行距条件下,须根系无芒雀麦 FR15 的侵蚀体积明显小于 TR15,说明须根系植物对土壤侵蚀的遏制作用总体强于直根系植物。通过比较不同无芒雀麦的处理,FR30 的土壤侵蚀总体最严重,平均侵蚀体积高达 0.35 m³;FR15 的侵蚀最弱,平均侵蚀体积仅 0.17 m³,但与 FR25、FR20 和 FR10 差别不大。

切沟侵蚀体积的变化趋势与总侵蚀体积类似,FR15 明显小于 CK 和 TR15;同样种植无芒雀麦,FR30 明显高于其他行距处理。除 FR15 B 外,各小区的切沟侵蚀占比均超过 50.00%,表明在试验设定的坡度、流量和植被条件下,切沟侵蚀是土壤侵蚀的主要形式。具体来看,TR15 的切沟侵蚀占比最高,平均高达 103.06%,表明该处理的切沟侵蚀体积甚至超过土壤侵蚀总体积,即在切沟以外区域,该处理的泥沙沉积量大于土壤侵蚀量,出现净堆积。对于无芒雀麦处理,切沟侵蚀占比也以种植行距最大的 FR30 最高。

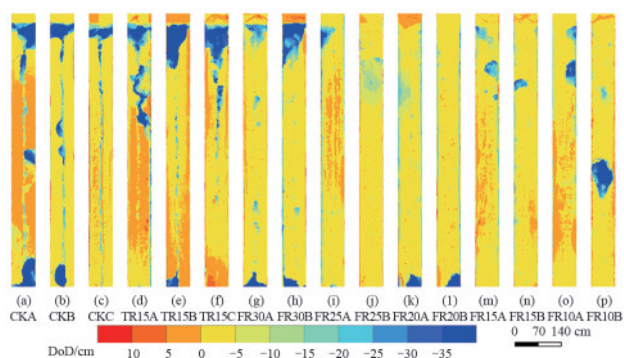


图3 不同处理小区冲刷前、后的地表高程差空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of surface DEM of difference (DoD) in plots with different treatments

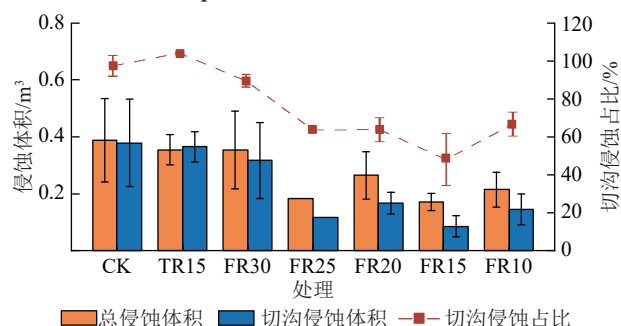


图4 不同处理的总侵蚀体积、切沟侵蚀体积及其占比

Fig. 4 Total erosion volume, gully erosion volume and its proportion in different treatments

2.3 不同处理的切沟发育

在冲刷试验过程中,CK、TR15、FR30、FR25各小区的初始沟道即雏形沟通过上溯、下切及侧岸扩张不断加深、加宽,发育形成所在小区唯一的切沟(图5)。与雏形沟一致,这些切沟均贯穿所在小区坡面,长度接近8.00 m小区坡长(表1),最大表面宽度除FR25外均接近小区宽度,且均出现在切沟沟头。相比之下,在种植行距较小、根重密度较大的须根系草本植物小区,雏形沟基本未发展成连续沟道,反而多在小区两侧或一侧边壁发育规模不一的切沟。值得注意的是,在FR20 A,尽管雏形沟也发展成切沟,但小区左侧边壁也有独立切沟发育。FR20的平均切沟长度仅6.05 m;FR15和FR10的沟长更小,平均仅2.50 m。3个处理小区发育的切沟最大表面宽度也较小,均接近0.40 m。从切沟平均表面宽度来看,CK和TR15均较大,可达0.20 m;对于须根系无芒雀麦小区,平均表面宽度随种植行距缩小总体呈先减小后增大趋势。FR30和FR10较大,平均值分别为0.21、0.25 m;FR20最小,平均仅0.08 m。

对比不同处理的切沟最大和平均深度,CK发育的切沟总体最深,平均深度达0.31 m,普遍高于草本植物小区;最大深度出现在沟头,平均达1.21 m。在相同的种植行距条件下,FR15的最大和平均深度均

远小于TR15;对于无芒雀麦小区,切沟最大深度除FR30外均较小,平均深度随种植行距减小总体呈先减小后增大趋势。

切沟周长的变化趋势与切沟宽度和深度略有不同。从平均周长来看,CK仅18.30 m,不及FR25的31.51 m。TR15的切沟周长也明显大于FR15,平均达21.71 m。随着无芒雀麦种植行距缩小,切沟周长总体也呈减小趋势。切沟面积的变化与周长类似,CK的切沟面积并非最大,平均仅1.67 m²;TR15明显大于FR15,随着种植行距缩小,无芒雀麦处理的切沟面积总体减小。切沟体积可直接反映切沟侵蚀强度,CK、TR15和FR30的切沟体积接近,为0.31~0.40 m³,远高于其余处理;无芒雀麦处理的切沟体积随种植行距缩小整体呈减小趋势。

宽深比可反映侵蚀沟横断面的窄深程度,随沟道发育总体减小^[22]。本研究中,初始沟道的宽深比为3.0,放水冲刷试验过后,不同处理的宽深比均明显降低至0.6~1.6,与黄土丘陵区的野外切沟调查结果基本一致^[23-24]。周长-面积比能较好地反映沟道的形状复杂程度^[17]。CK、TR15和FR30的切沟周长-面积比较小,平均为11.0,说明其沟道形状较简单。对于无芒雀麦处理,切沟周长-面积比随种植行距减小呈先增大后减小趋势,表明切沟沟道形状经历由简单至复杂再到简单的变化过程。

2.4 切沟主要形态参数与根重密度的关系

种植行距主要通过改变根系生长状况来影响土壤侵蚀^[9]。作为表征土壤根系特征的重要参数,根重密度与土壤抗蚀性能密切相关^[6],进而影响切沟发育。因此,本研究基于裸地对照(CK)和无芒雀麦各处理的试验结果,分析切沟主要形态参数与不同土层根重密度的相关关系。结果表明,除周长和宽深比外,各切沟形态参数均至少与1个土层的根重密度显著相关(图6)。除周长-面积比外,对应相关系数均为负值,说明根重密度越大,切沟规模总体越小。具体而言,切沟长度、面积仅与0~10 cm土层根重密度显著相关,对应的相关系数分别为-0.72和-0.82;切沟平均宽度仅与20~40 cm土层根重密度显著相关,对应的相关系数为-0.63;切沟最大宽度、最大深度、平均深度和体积则与各土层根重密度均显著相关,相关系数为-0.92~-0.64。与此相反,切沟周长-面积比与0~40 cm土层根重密度呈显著正相关,相关系数为0.64~0.74。切沟周长和宽深比分别与0~10、40~60 cm土层根重密度相关性最强,对应相关系数分别为-0.57、0.56,但显著性 p 值略>0.05。

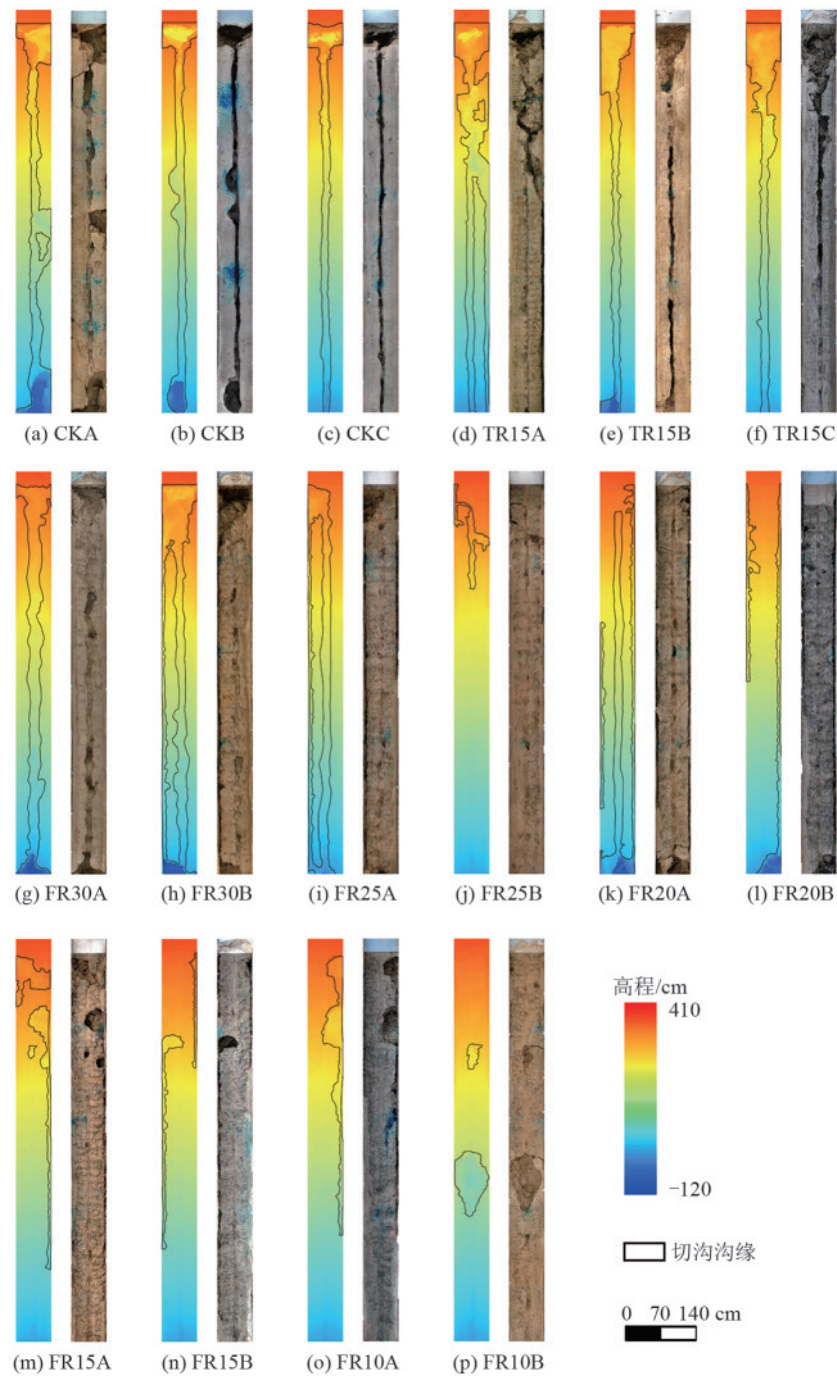


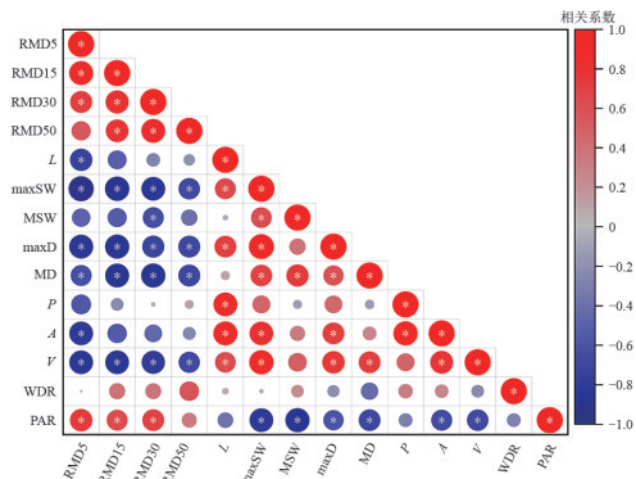
图 5 不同处理小区冲刷试验后的地表 DEM 和 DOMs

Fig. 5 Surface DEMs and digital orthophoto maps (DOMs) of plots with different treatments upon *in situ* scouring experiments

表 1 不同处理发育切沟的主要形态参数平均值

Table 1 Means of main morphological parameters of gullies developed in different treatments

处理	长度/m	最大表面 宽度/m	平均表面 宽度/m	最大 深度/m	平均 深度/m	周长/m	面积/m ²	体积/m ³	宽深比	周长-面积比/ (m ⁻¹)
CK	7.81	0.70	0.21	1.21	0.31	18.30	1.67	0.40	0.66	11.18
TR15	7.85	0.69	0.21	0.95	0.25	21.71	1.97	0.38	0.88	10.89
FR30	7.78	0.70	0.21	1.16	0.16	25.17	2.15	0.31	1.26	11.53
FR25	7.90	0.43	0.13	0.43	0.08	31.51	1.87	0.09	1.58	16.88
FR20	6.05	0.38	0.08	0.64	0.09	16.51	0.68	0.06	0.88	30.06
FR15	2.61	0.35	0.12	0.31	0.13	6.14	0.25	0.02	0.88	27.67
FR10	2.44	0.44	0.25	0.47	0.23	5.75	0.47	0.09	1.06	13.13



注: L、maxSW、MSW、maxD、MD、P、A、V、WDR、PAR 分别为切沟的长度、最大表面宽度、平均表面宽度、最大深度、平均深度、周长、面积、体积、宽深比和周长-面积比; RMD5、RMD15、RMD30、RMD50 分别为 0~10、10~20、20~40、40~60 cm 土层的根重密度; *表示相关性显著 ($p < 0.05$)。

图6 切沟主要形态参数与不同土层根重密度的相关系数
Fig. 6 Correlation coefficients between main gully morphological parameters of gullies and root mass density of different soil layers

各土层根重密度多与一个或多个切沟形态参数

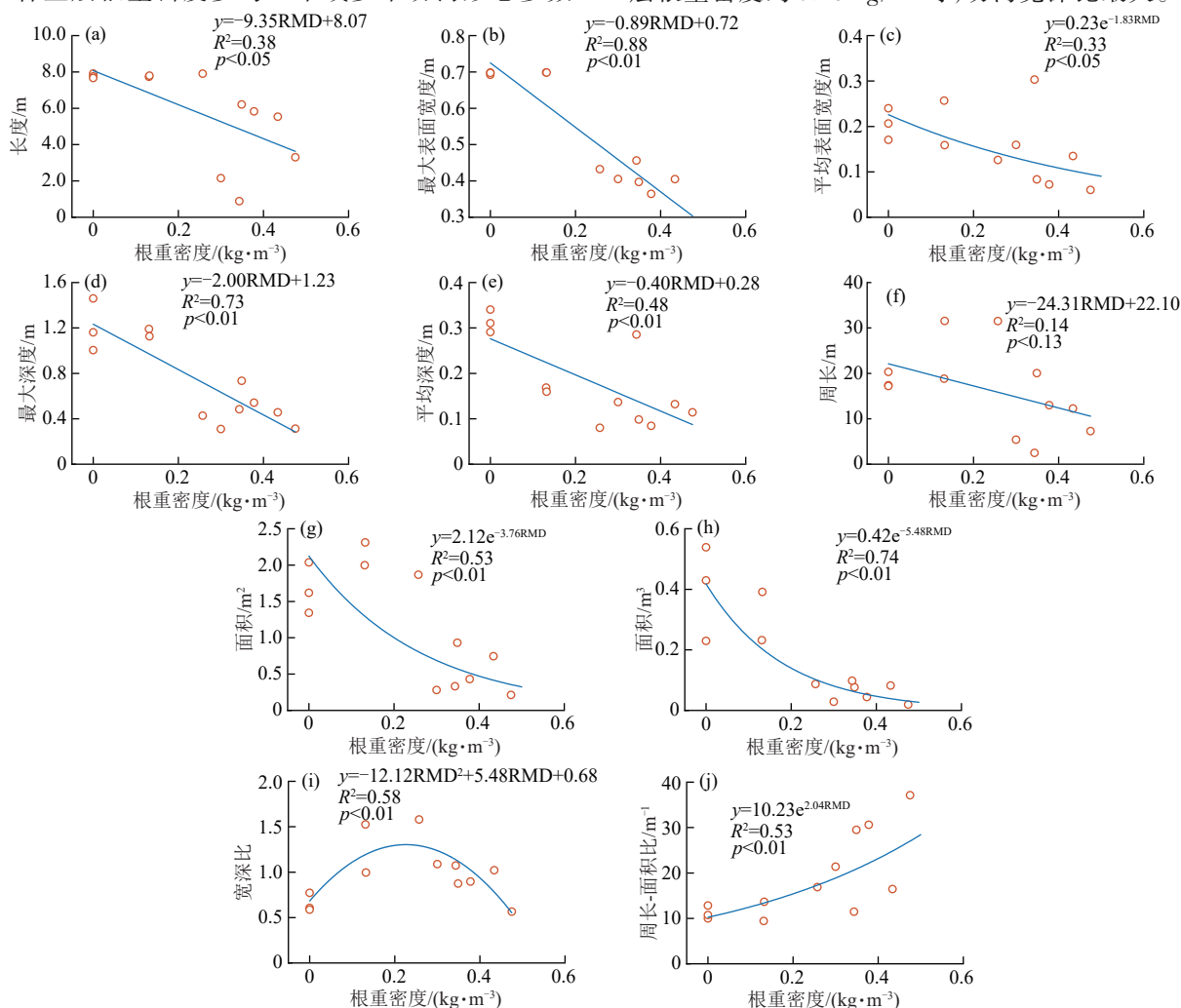


图7 切沟形态参数随0~60 cm土层根重密度(RMD)的变化及其拟合方程

Fig. 7 Changes of gully morphological parameters with root mass density of 0~60 cm soil layer (RMD) and their fitted models
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

存在显著的相关关系,即便是根重密度较小的20~40、40~60 cm土层,也分别与6、4个切沟形态参数显著相关(图6)。因此,以切沟各形态参数为因变量(y),建立其与0~60 cm土层根重密度(RMD)的回归方程(图7)。结果表明,除切沟周长外,各形态参数与根重密度的拟合方程均在0.05的置信水平显著,对应的决定系数(R^2)为0.33~0.88,说明根重密度变化可解释这些形态参数33%~88%的变异。其中,切沟长度、最大表面宽度、最大和平均深度均随根重密度呈线性下降,下降速率为0.40~9.35 m^2/kg 。切沟平均表面宽度、面积和体积随根重密度增大呈指数递减,对应的指数系数分别为-1.83、-3.76和-5.48;与此相反,切沟周长-面积比随根重密度增大呈指数递增,对应的指数系数为2.04。切沟宽深比虽与各土层根重密度的线性相关关系不显著,但其与0~60 cm土层根重密度的回归模型在0.01的置信水平显著,二者呈显著的二次函数关系,表明切沟宽深比随根重密度呈先增大后降低趋势,在0~60 cm土层根重密度约0.23 kg/m^3 时,切沟宽深比最大。

3 讨论

3.1 根系类型对切沟发育的影响

相比须根系植物,直根系植物的主根优势明显,入土一般较深^[25]。从研究的测量结果来看,直根系草本植物紫花苜蓿的根重密度随土层深度显著降低。由于须根系草本植物根系也主要分布在浅层,同一种植行距条件下的紫花苜蓿(TR15)和无芒雀麦(FR15)的根重密度在0~10 cm土层并无显著差异,但在10~20 cm土层,前者的根重密度显著高于后者,与刘芳等^[25]在黄土高原北部六道沟小流域的研究结果基本一致。然而,植物根系的减蚀效应不仅受根重密度影响,还与根系构型和分布密切相关^[7]。与直根系植物相比,须根系植物的细根往往更发达,根系网络结构更复杂,根系与土壤接触相应也更充分^[4,26]。这些根系一方面可通过固结缠绕和吸附牵拉等作用将土壤颗粒串联起来,增强土壤的抗剪强度;另一方面,还可通过与土壤之间的生物化学作用,提高土壤团聚体稳定性^[4-6]。因此,生长须根系植物的土壤,其内摩擦角和水稳性团聚体含量通常高于生长直根系植物的土壤,对土壤侵蚀的阻控作用往往较强^[27]。比较CK、TR15和FR15的切沟侵蚀体积及其占比发现,须根系不仅抑制切沟侵蚀的作用明显强于直根系,还可有效降低切沟侵蚀对坡面土壤侵蚀的相对贡献;而直根系处理的平均切沟侵蚀体积尽管较裸地略低,但切沟侵蚀占比明显偏高,可见对切沟发育的阻控作用有限。

从切沟形态参数来看,TR15与CK均十分接近,仅切沟最大深度略有差异,前者平均仅为后者的78%,表明直根系可在一定程度上限制切沟的下切极限。比较FR15与CK,除宽深比和周长-面积比外,前者的各切沟形态参数均明显较小,尤其是切沟最大和平均深度、周长、面积和体积,前者分别是后者的26%、41%、34%、15%和6%。FR15的切沟长度、宽度、深度、周长、面积和体积均小于TR15,尤其是周长、面积和体积,前者分别是后者的28%、13%和6%,再次证明须根系对切沟侵蚀的抑制作用明显强于直根系。CK和TR15的切沟宽深比与FR15差别不大,但周长-面积比远小于FR15。可见,须根系使发育沟道形态更为复杂,切沟沟缘更加曲折,分布更加破碎。

3.2 根系密度对切沟侵蚀的影响

对于须根系草本植物无芒雀麦,种植行距主要影响0~10 cm土层的根系密度。随种植行距缩小,根重密度首先增大;但当行距 ≤ 20 cm时,根重密度

趋于稳定。可能是因为在黄土丘陵沟壑区,水分和养分等资源有限,当达到一定的种植密度时,缩小种植行距无法促进植株根系的进一步生长^[6]。随土层深度增大,土壤水肥更为匮乏,除20~40 cm土层FR30的根重密度小于其余无芒雀麦处理外,各土层不同行距处理之间并无显著差异。与根重密度随种植行距的变化趋势相反,土壤侵蚀体积和切沟侵蚀体积均表现为FR30明显高于其余须根系处理。该结果与GUO等^[9]开展的沟头溯源侵蚀模拟试验基本一致。FR30的切沟侵蚀占比也高于其余处理,说明提高根系密度对切沟侵蚀的遏制作用强于细沟和细沟间侵蚀。需要说明的是,土壤表层植物根系在人为刮制雏形沟过程中遭到一定程度的破坏,其对土壤侵蚀的遏制作用可能会有所低估。

根重密度与种植行距并非呈单调线性关系,因此,各切沟形态参数随二者的变化趋势并不一致。除周长和宽深比外,各切沟形态参数均与一个或多个土层根重密度显著相关,说明根重密度对切沟形态特征具有普遍影响。回归分析结果显示,随着根重密度增大,切沟长度、最大表面宽度、最大和平均深度均呈线性下降,但切沟平均表面宽度呈指数递减,切沟面积和体积相应也呈指数下降。有研究^[4]表明,在集中水流冲刷条件下,土壤分离速率通常与根系密度呈指数函数关系。根系密度越大,土壤抗蚀性能增强,土壤分离速率降低;GYSEL等^[28]和郭明明^[29]通过模拟冲刷试验也发现,浅沟和切沟溯源侵蚀量随根系密度呈指数下降。但前者并未给出具体参数,后者建立的是溯源侵蚀产沙量与根重密度的定量关系,指数系数无法直接进行比较。切沟的周长-面积比同样与根重密度呈显著的指数函数关系。随着种植行距缩小,根重密度增大,切沟周长变化不大,但面积呈指数递减,周长-面积比呈指数上升,即根系密度越大,切沟沟道形态的复杂程度呈指数上升。切沟宽深比与根重密度呈显著的二次函数关系。一般而言,随着根系密度增大,其与土壤颗粒的接触面积相应增大^[4],土壤抗蚀能力增强,径流难以下切,便开始转向侧岸侵蚀,从而促使宽深比增大。但当根系密度增大至一定程度时,切沟的侧岸扩张也受到限制,使宽深比有所下降。本研究中,当根重密度较小时,径流主要集中在预先布设的雏形沟中进行沟底和沟岸侵蚀;当根重密度较大时,土壤侵蚀阻力随之增大^[13],雏形沟难以继续侵蚀,水流开始分散至小区边壁与土壤的不连续界面,并冲刷形成窄深沟道,从而降低小区平均宽深比。

4 结论

1) 在同一种植行距条件下,须根系对切沟侵蚀的阻控作用明显强于直根系。相比直根系处理,须根系处理的土壤侵蚀总体积和切沟侵蚀体积均较低,发育切沟的长度、宽度、深度、周长、面积和体积也明显较小,且沟道形态更为复杂、破碎。

2) 对比不同种植行距的须根系草本植物处理发现,除切沟周长和宽深比外,各切沟形态特征均与根重密度显著相关。随着根重密度增大,切沟规模不断缩小。其中,切沟长度、最大表面宽度、最大和平均深度线性减小,平均表面宽度、面积和体积呈指数降低,周长-面积比呈指数增大,宽深比则呈先增后减趋势。

本研究仅考虑根系类型和根系密度2个根系特征发现,在试验设定的坡度和流量条件下,以15 cm行距种植无芒雀麦对切沟侵蚀的阻控作用最强。然而,植物根系的减蚀效果可能还与根长、根径等根系特性有关,未来可引入根系扫描设备开展测量和研究,全面分析草本植物根系对切沟发育的定量影响。

参考文献:

- [1] 张光辉,杨扬,符素华,等.切沟侵蚀预报研究进展与展望[J].地球科学进展,2022,37(6):551-562.
ZHANG G H, YANG Y, FU S H, et al. Advances and prospects of gully erosion prediction [J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(6): 551-562.
- [2] 张楠,张岩,王佳希,等.黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀沟数量及形态特征[J].水土保持学报,2023,37(3):109-115.
ZHANG N, ZHANG Y, WANG J X, et al. Quantity and morphological parameters of gullies in small watersheds in the hilly-gully Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 109-115.
- [3] 田培,毛梦培,潘成忠.植被调控水土流失机制研究进展及展望[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(1):131-140.
TIAN P, MAO M P, PAN C Z. Research progress and prospect of vegetation control mechanism of soil and water loss [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(1): 131-140.
- [4] VANNOPPEN W, VANMAERCKE M, DE BAETS S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 666-678.
- [5] 马金龙,王兵.1962—2022年土壤抗冲性研究进展[J].农业工程学报,2023,39(17):19-28.
MA J L, WANG B. Research progress of soil anti-scourability from 1962 to 2022 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(17): 19-28.
- [6] 刘均阳,周正朝,韩玮霄.不同种植密度下草本植物根系生长对土壤侵蚀阻力的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):40-47.
LIU J Y, ZHOU Z C, HAN W X. Effects of herbaceous root growth on soil resistance to erosion under different planting densities [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 40-47.
- [7] WANG B, LI P P, HUANG C H, et al. Effects of root morphological traits on soil detachment for ten herbaceous species in the Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: e142304.
- [8] WANG J F, YANG Y F, WANG B, et al. Soil detachment caused by flowing water erosion in six typical herbaceous plant root systems on the Loess Plateau, China [J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 217: 56-67.
- [9] GUO M M, WANG W L, SHI Q H, et al. An experimental study on the effects of grass root density on gully headcut erosion in the gully region of China's Loess Plateau [J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(17): 2107-2125.
- [10] 冯兰茜,王文龙,郭明明,等.根系密度对黄土塬沟头溯源侵蚀产沙和形态演化过程的影响[J].农业工程学报,2020,36(6):88-96.
FENG L Q, WANG W L, GUO M M, et al. Effects of root density on gully headcut erosion and morphological evolution process in gully regions of Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(6): 88-96.
- [11] 郭明明,刘欣,陈卓鑫,等.呼伦贝尔草原切沟形态发育特征与体积估算模型[J].农业工程学报,2024,40(14):81-90.
GUO M M, LIU X, CHEN Z X, et al. Morphological characteristics and volume estimation model of the permeant gully in the Hulunbuir Grassland of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(14): 81-90.
- [12] 何涛,史扬子,杨扬,等.切沟侵蚀测量方法研究进展[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(2):151-158.
HE T, SHI Y Z, YANG Y, et al. Research progress on gully erosion measurement methods [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(2): 151-158.
- [13] ZENG R C, ZHANG G H, SU X F. Seasonal variation in soil erosion resistance of gullies covered by different plant communities on the Loess Plateau of China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2025, 13(3): 589-599.
- [14] 赵龙山,侯瑞,吴发启.黄土坡面细沟侵蚀研究进展与展望[J].中国水土保持,2017(9):47-51.

- ZHAO L S, HOU R, WU F Q. Progress and prospects of study on rill erosion of loess slope[J]. Soil and Water Conservation in China, 2017(9): 47-51.
- [15] 郑粉莉, 徐锡蒙, 韩勇. 浅沟和切沟侵蚀研究[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- ZHENG F L, XU X M, HAN Y. Research on shallow gully and rill erosion[M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [16] KANG H L, WANG W L, LI L N, et al. Morphology evolution of vegetation-covered loess gully heads induced by hydraulic and gravitational erosion[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2025, 13(2): 447-462.
- [17] 杨扬, 陈薪伊, 黄烨, 等. 黄土丘陵沟壑区切沟形态特征对放水流量的响应[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2025, 23(3): 33-41.
- YANG Y, CHEN X Y, HUANG Y, et al. Responses of gully morphological characteristics to flow discharge in the loess hilly-gully region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(3): 33-41.
- [18] LOU Y B, ZHU Y N, WEI J, et al. Effects of vegetation on runoff hydrodynamics and erosion morphologies in head-cut erosion processes in the loess tableland region[J]. Water Resources Research, 2025, 61(2): e2024WR038274.
- [19] JAMES M R, ROBSON S, SMITH M W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: Precision maps for ground control and directly georeferenced surveys[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(12): 1769-1788.
- [20] ZHU X M, LI Y S, PENG X L, et al. Soils of the loess region in China[J]. Geoderma, 1983, 29(3): 237-255.
- [21] 刘宝元, 刘刚, 王大安, 等. 区域沟蚀野外调查方法: 以东北地区为例[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 34-40.
- LIU B Y, LIU G, WANG D A, et al. A field survey method for regional gully erosion: A case study in north-eastern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 34-40.
- [22] 赵春红, 高建恩. 坡面不同侵蚀沟断面特征及水力几何形态[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 22-30.
- ZHAO C H, GAO J E. Cross-section characteristics and hydraulic geometry of different erosion gullies on slopes[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(1): 22-30.
- [23] 唐杰, 张岩, 范聪慧, 等. 使用高分遥感立体影像提取黄土丘陵区切沟参数的精度分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 111-117.
- TANG J, ZHANG Y, FAN C H, et al. Accuracy assessment of gully morphological parameters from high resolution remote sensing stereoscopic satellite images on hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(18): 111-117.
- [24] 李镇, 张岩, 尚国珩, 等. 晋西黄土区切沟断面特征及体积估算模型[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 152-159.
- LI Z, ZHANG Y, SHANG G F, et al. Characterizing gully cross section and modelling gully volume in hilly loess region of western Shanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 152-159.
- [25] 刘芳, 王佩佩, 曹玉莹, 等. 黄土高原典型草本植物根系分布特征及其对土壤理化性质的影响研究[J]. 草业学报, 2024, 33(10): 1-13.
- LIU F, WANG P P, CAO Y Y, et al. Root distribution characteristics of typical herbaceous plants and their effects on soil physicochemical properties on the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(10): 1-13.
- [26] 万海霞, 蔡进军, 郭永忠, 等. 宁夏南部黄土丘陵区典型草本根系分布特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 149-156.
- WAN H X, CAI J J, GUO Y Z, et al. Characteristics of root distributions of typical herbs in loess hilly region of southern Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 149-156.
- [27] 田愉琴, 王兵, 汪建芳, 等. 黄土丘陵区典型草本根系特征对土壤抗剪特性的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 153-159.
- TIAN Y Q, WANG B, WANG J F, et al. Influence of typical herbaceous root characteristics on soil shear properties in loess hilly regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 153-159.
- [28] GYSSELS G, POESEN J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(4): 371-384.
- [29] 郭明明. 黄土高原沟壑区退耕草地沟头溯源侵蚀及形态演化特征[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 27-57.
- GUO M M. Gully headward erosion and its morphology evolution characteristics of rehabilitated grass land in the gully region of the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016: 27-57.