

黄土高原刺槐林地根系与枯落物对土壤侵蚀的影响

王丹丹, 许海超, 单志杰, 秦 伟

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为探讨自然条件下黄土高原地区刺槐林地枯落物和根系对土壤侵蚀的影响。采用 5 个坡度(8.7%, 17.6%, 26.8%, 36.4% 和 46.6%)及 3 种流量(0.5, 1.0, 2.0 L/s)分别在有枯落物覆盖、去除枯落物的植被和裸坡样地进行试验, 探讨刺槐林地枯落物和根系对土壤侵蚀的影响。结果表明, 枯落物和根系对土壤侵蚀有显著影响, 当枯落物厚度超过 3 cm、根系密度 $>0.5\text{ kg/m}^3$ 时, 土壤侵蚀量减小程度趋于稳定。与裸坡相比, 刺槐林地土壤侵蚀量减少约 55%, 且根系和枯落物对土壤侵蚀量减少的贡献率分别为 66% 和 34%。此外, 枯落物与根系可降低土壤可蚀性, 增加土壤剪切力, 进而增强土壤的抗蚀能力。与裸坡相比, 有枯落物覆盖和去除枯落物覆盖的植被样地土壤可蚀性分别降低 80% 和 66%, 土壤剪切力分别提高 285% 和 237%。研究结果为揭示森林植被的土壤侵蚀机制提供新的思路, 对改善黄土高原的植被建设具有一定的指导意义。

关键词: 土壤侵蚀; 枯落物; 根系; 土壤可蚀性; 临界剪切力

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)02-0083-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.02.011

Effects of *Robinia pseudoacacia* Litter Cover and Roots on Soil Erosion in the Loess Plateau, China

WANG Dandan, XU Haichao, SHAN Zhijie, QIN Wei

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038)

Abstract: In this study, the effects of *Robinia pseudoacacia* litter cover and roots on soil erosion was explored in the Loess Plateau. Five slope gradients (8.7%, 17.6%, 26.8%, 36.4% and 46.6%) and three flow discharges (0.5, 1.0 and 2.0 L/s) in vegetation covered with litter removal and bare slope plots, respectively, were used to investigated the effects of *Robinia pseudoacacia* litter cover and roots on soil erosion. The results indicated that litter cover and roots had significant effect on soil erosion, the reduction degree of soil erosion tended to be stable when the litter thickness was more than 3 cm and the root density was more than 0.5 kg/m^3 . Soil erosion amount of *Robinia pseudoacacia* was reduced by about 55% compared with the bare slope, and the contribution rate of litter cover and roots to soil erosion amount reduction was 66% and 34%, respectively. Moreover, the combination of litter cover and roots can reduce soil erodibility and increase soil critical shear stress, and consequently strengthen soil resistance capacity to erosion. Compared with the bare slope, soil erodibility was decreased by 80% and 66%, and soil critical shear stress was increased by 285% and 237%, respectively, in the plots with and without litter cover. These results provide a new idea for revealing the soil erosion mechanism of forest vegetation and have certain guiding significance for improving vegetation construction in the Loess Plateau.

Keywords: soil erosion; litter cover; plant roots; soil erodibility; critical shear stress

土壤侵蚀是全球范围内最主要的生态环境问题, 严重的土壤侵蚀导致表土流失、土壤退化, 农田和林地生产力下降, 进而威胁农业生产和粮食安全^[1-3]。

黄土高原是我国水土流失和土地退化极为严重的区域, 植被恢复被认为是减少土壤侵蚀最有效的方法, 为了减少水土流失、改善黄土高原生态环境状况,

1999 年以来,国家实施了退耕还林(草)工程,使区域内植被覆盖率提高,生态环境逐步得到改善^[4]。

土壤侵蚀受多种因素影响,如土壤性质(有机质、土壤含水量、土壤固结度)、植物性质(枯落物、根系)、水力特性(流速、流量、坡度)和土地利用等。Brown 等^[5]研究发现,土壤侵蚀量随土壤固结度的增加而减少;Knapen 等^[6]研究发现,随着土壤含水量和有机质含量的增加,土壤可蚀性(K_c)降低,临界剪切力(t)增加;Zhang 等^[7-9]研究发现,土壤侵蚀随坡度和流量的增加而增加,土地利用类型对土壤侵蚀的影响从低到高依次为农田、草地、灌木和林地。

除土壤性质、水力特性和土地利用外,枯落物和根系对土壤侵蚀也有重要影响。枯落物可增加表层土壤的粗糙度,截留部分降雨,消减地表径流,增加土壤入渗,被认为是土壤侵蚀量减少的关键因子^[10]。然而,当发生火灾或密集放牧后土壤侵蚀量仍显著减少,这表明即使在枯落物被移除的情况下,植被仍可通过其根系发挥抗蚀作用^[11]。许多研究^[1,3,12]表明,植物枯落物和根系是导致土壤侵蚀量减少的重要因素,Gyssels 等^[12]认为对于击溅和细沟侵蚀,植物枯落物比根系对土壤侵蚀量减少的影响更大;Zhou 等^[1]在降雨模拟试验中发现,植物根系可以减少约 96% 的土壤侵蚀量。然而,自然条件下量化枯落物和根系对森林植被土壤侵蚀的影响仍未见报道。本研究以黄土高原的优势树种刺槐林地为研究对象,研究目的是:(1)阐明不同枯落物厚度对土壤侵蚀的影响;(2)分析土壤侵蚀与植被根系的相关性;(3)探讨不同坡度和流量下枯落物和根系对土壤侵蚀的贡献率;(4)量化有枯落物覆盖植被样地、去除枯落物植被样地和裸坡的土壤侵蚀量与土壤可蚀性和临界剪切力的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于北京林业大学所属的山西省吉县蔡家川流域(110°39′45″—110°47′45″E,36°14′27″—36°18′23″N),海拔 900~1 513 m(图 1)。该流域为典型的黄土残塬沟壑区,流域面积 38 km²,长约 14 km,该流域属于大陆性气候,年均降水量 575.9 mm,6—9 月降水量约占全年降水量的 70%,且多为暴雨形式,年均水面蒸发量 1 732.9 mm,年均气温 10 ℃,绝对最高温度 38.1 ℃,绝对最低温度 -20.4 ℃,多年平均日照时间为 2 565.8 h,无霜期为 172 天。土壤为褐土,黄土母质,森林覆盖率为 39.8%,主要造林树种为油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco),灌木树种主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)和虎榛子(*Ostryopsis davidiana*

Decaisne)等,经济林树种主要有苹果(*Malus pumila* Mill.)、杏树(*Prunus armeniaca* L.)和梨树(*Pyrus* Spp.)等,草本有蒿类(*Artemisia* sp.)和白草(*Pennisetum flaccidum* Griseb.)等。

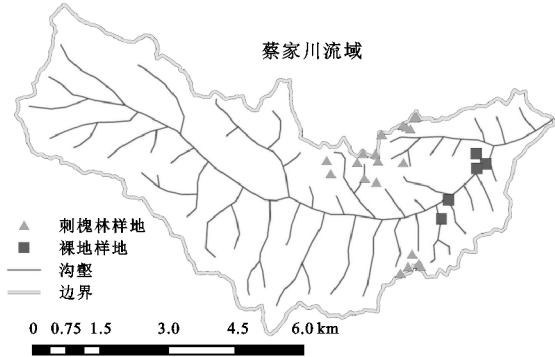


图 1 研究区概况与样地设置

1.2 土壤侵蚀试验

自 1994 年以来,刺槐是该研究区域中最典型的优势树种,因此本文以刺槐作为研究对象。刺槐林样地林分密度为 1 127 株/hm²,平均胸径 29.8 cm,平均树高 9.6 m。研究样地有部分林下植被(林下植被为艾蒿及白草等草本植物,平均盖度为 50%~60%),表层土壤完全被枯落物覆盖。为了研究坡度和流量对刺槐林地土壤侵蚀的影响,本研究设置 5 种坡度(8.7%,17.6%,26.8%,36.4%和 46.6%)和 3 种流量(0.5,1.0,2.0 L/s)的土壤侵蚀对比试验,用坡度仪选取试验样地(每个坡度选取 5 个不同枯落物厚度的试验样地),划定不同坡度样地的面积为 20 m×20 m,在每个坡度另选取 1 个裸坡样地作为对照。本试验于 2020 年 6—8 月进行。为了测定土壤侵蚀,用 2 块长 4 m、宽 0.15 m 的铁板相距 0.1 m 沿坡面插入土壤中围成冲刷区,冲刷区面积为 0.4 m²,供水系统采用容积为 200 L 的马里奥托瓶(图 2)。试验时,水量由马里奥托瓶的阀门控制,以确保流速和流量稳定。在冲刷区底部,放置 1 个集水槽和塑料瓶来收集泥沙水样。

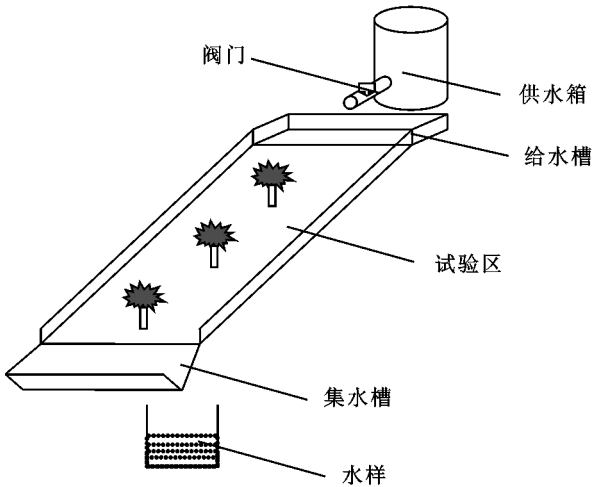


图 2 试验装置示意

采用 KMnO_4 染色技术在稳定流量条件下进行 5 次重复试验,测定水量的流速(V_f)。水量流速的平均值为:

$$V_a = KV_f \quad (1)$$

式中: K 为系数值 $0.8^{[13-14]}$ 。水流深度计算公式为:

$$H = Q/BV_a \quad (2)$$

式中: H 为水流深度(m); Q 为流量(m^3/s); B 为水槽宽度(m); V_a 为水量流速的平均值(m/s) $^{[8-9]}$ 。剪切力的计算公式为:

$$\tau = rghS \quad (3)$$

式中: τ 为剪切力(Pa); r 为水的密度(kg/m^3); g 为重力常数(m/s^2); h 为水流深度(m); S 为坡度(%)。

不同坡度和流量组合下,植被、根系和裸坡的剪切力分别为 $4.13 \sim 15.69, 3.46 \sim 11.17, 1.05 \sim 6.74$ Pa。

当塑料瓶中的泥沙水样达到 500 mL 时,停止冲刷试验,将铁盒中残留的泥沙转移到塑料瓶中。每个流量和坡度组合下,在有枯落物覆盖、去除枯落物覆盖与裸坡样地重复试验 5 次,共计 225 次冲刷试验。试验后,所有泥沙水样被带回实验室进行过滤,在 105°C 下烘干 24 h 后称重,其干土重量的平均值代表土壤侵蚀量。

植被(E_p)、根系(E_r)和枯落物覆盖度(E_l)对土壤侵蚀减少率可表示为:

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{S_b - S_p}{S_b} \times 100\% \\ E_r &= \frac{S_b - S_r}{S_b} \times 100\% \\ E_l &= E_p - E_r \end{aligned} \quad (4)$$

式中: S_b 、 S_p 、 S_r 分别表示裸坡、有枯落物覆盖植被、去除枯落物后根系的土壤侵蚀量。植被土壤侵蚀量减少主要是根系和枯落物共同作用的结果。因此,根系(C_r)和枯落物(C_l)对植被土壤侵蚀的贡献率的计算公式为:

$$\begin{aligned} C_r &= \frac{E_r}{E_p} \times 100\% \\ C_l &= \frac{E_l}{E_p} \times 100\% \end{aligned} \quad (5)$$

相对土壤侵蚀量(RE_c)是 5 种枯落物厚度的土壤侵蚀量占裸坡土壤侵蚀量的比例。可蚀性(K)和临界剪切力(τ_c)是衡量土壤抗侵蚀能力的重要指标。

Nearing 等 $^{[15]}$ 采用 WEPP 模型建立可蚀性与剪切力的线性回归关系:

$$E_c = K_r(\tau - \tau_c) \quad (6)$$

式中: E_c 为土壤侵蚀量(g/L); τ 为剪切力(Pa)。

1.3 枯落物和根系的测定

为了分析枯落物厚度和根系对土壤侵蚀的影响,每个坡度选取 5 个枯落物厚度的试验样地进行冲刷试验,不同坡度下每个样地重复试验 5 次以获得平均

值。在土壤侵蚀试验开始前,用钢尺测定刺槐样地枯落物厚度(精确到 cm)并将其分成 0—1, 1—2, 2—3, 3—4, 4—5 cm。土壤侵蚀试验结束后,将地下 0—40 cm 处土样用直径 7 cm 土钻按 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 分层收集并密封带回实验室,采用流水法将根系冲洗干净,根据根系直径大小,将根系分为 3 类:细根(<1.0 mm)、中根($1.0 \sim 5.0$ mm)和粗根(>5.0 mm),并将所有根在 60°C 下烘干 48 h,并称重以计算根系质量密度(RD , kg/m^3),计算公式为:

$$RD = \frac{M_d}{V} \quad (7)$$

式中: M_d 为根重量(kg); V 为土样体积(m^3)。

1.4 数据分析

利用 Pearson 相关性分析方法对土壤侵蚀、根系质量密度与根径的关系进行分析。采用线性和非线性回归模型研究根系质量密度对土壤侵蚀的影响、土壤侵蚀量和枯落物厚度的关系与土壤侵蚀速率和剪切力的关系。所有统计分析均在 SPSS 19.0 软件中进行。

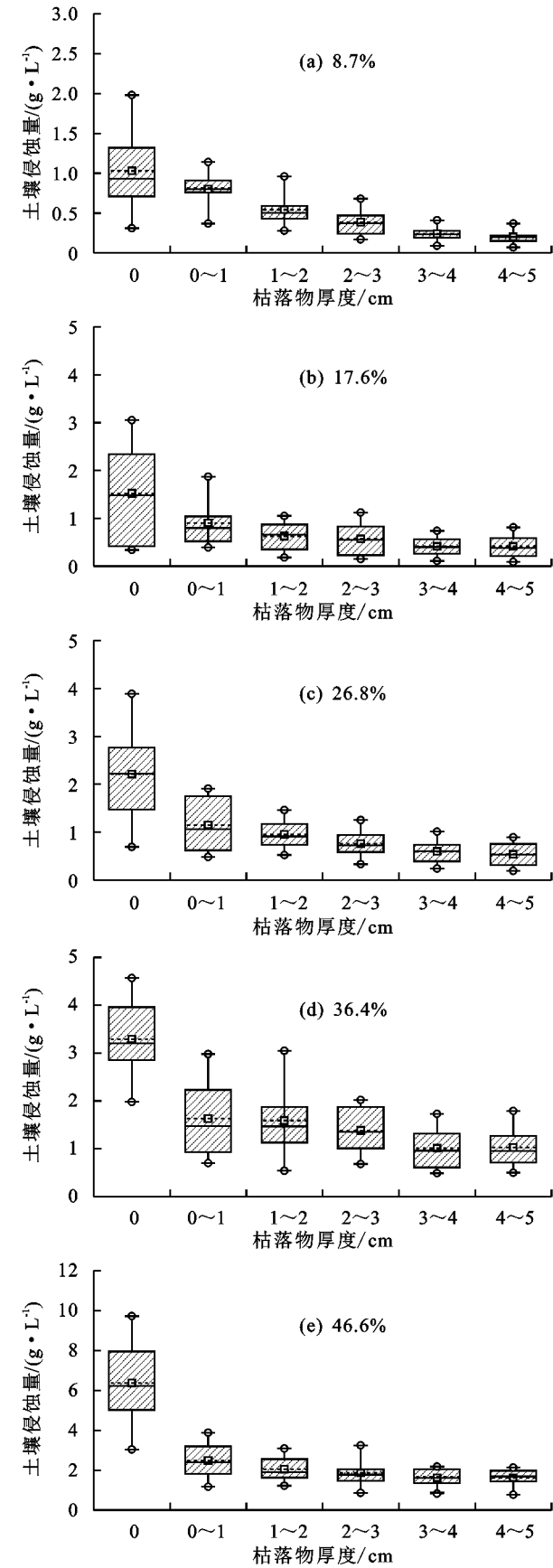
2 结果与分析

2.1 枯落物对土壤侵蚀的影响

不同厚度的枯落物对土壤侵蚀有显著影响,且有枯落物覆盖的样地土壤侵蚀量小于裸坡(图 3)。有枯落物覆盖的 5 个坡度样地(8.7%, 17.6%, 26.8%, 36.4% 和 46.6%)的侵蚀量分别为 $0.23 \sim 0.84, 0.44 \sim 0.92, 0.55 \sim 1.17, 1.01 \sim 1.65, 1.60 \sim 2.51$ g/L,其平均值分别为 $0.46, 0.57, 0.83, 1.36, 1.92$ g/L。与裸坡相比,不同坡度下有枯落物覆盖的土壤侵蚀量分别减少 56.9%, 61.2%, 64.3%, 67.4% 与 69.5%。土壤侵蚀随枯落物厚度的增加呈减少趋势。5 种枯落物厚度下的土壤侵蚀量远小于裸坡。除枯落物厚度 3—4 cm 与 4—5 cm,其他 3 种不同枯落物厚度的土壤侵蚀量差异显著(图 3)。当枯落物厚度达到 3 cm,可有效地防止水土流失;枯落物厚度超过 3 cm,土壤侵蚀量稳定在 1 个较低值。

不同枯落物厚度的平均土壤侵蚀量(RE_c)分别为 $0.34 \sim 0.46, 0.28 \sim 0.43, 0.24 \sim 0.38, 0.14 \sim 0.29, 0.12 \sim 0.28$ g/L。在 5 个坡度中, RE_c 随枯落物厚度的增加呈指数下降,相关系数(R^2)均大于 0.9(表 1)。土壤侵蚀量与枯落物厚度呈负指数关系,这一结果与之前林地枯落物 $^{[12,16]}$ 和草地枯落物 $^{[14,17]}$ 对土壤侵蚀影响的研究结果一致。不同坡度的指数方程系数分别为 $-0.261, -0.207, -0.212, -0.183, -0.134$; Poesen 等 $^{[18]}$ 认为,回归系数表明植物枯落物对减少土壤侵蚀量的有效性,即该系数描述枯落物厚度对侵蚀过程的影响。回归系数的差异可能与枯落物形状、土壤性质、分解速率和气候有关 $^{[5]}$ 。在本研究中,土壤性质、气候条

件和植被枯落物分解速率相同,说明不同坡度和枯落物形状的综合作用导致这些系数的差异。



注:箱图的底部和顶部表示第 25/75 个百分位,须表示第 5/95 个百分位,黑点表示偏差值,虚线表示平均值,实线表示中值。
图 3 不同枯落物厚度对刺槐林地土壤侵蚀的影响

表 1 不同坡度下土壤侵蚀量(RE_c)与枯落物厚度(L_c)的关系

坡度/%	指数方程	R^2	p
8.7	$RE_c = e^{-0.261 L_c}$	0.95	<0.001
17.6	$RE_c = e^{-0.207 L_c}$	0.91	<0.001
26.8	$RE_c = e^{-0.212 L_c}$	0.96	<0.001
36.4	$RE_c = e^{-0.183 L_c}$	0.94	<0.001
46.6	$RE_c = e^{-0.134 L_c}$	0.97	<0.001

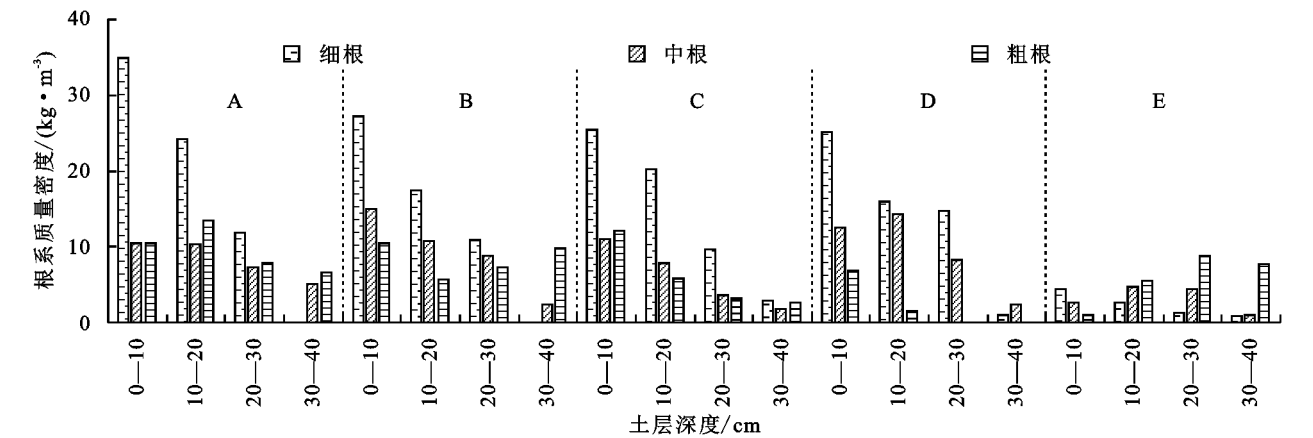
2.2 土壤侵蚀与植被根系的相关性分析

刺槐林地不同坡度下的根系主要分布在土壤表层,根系生物量随土层深度的增加而显著减少,且不同土层 3 种直径的根系分布不均匀(图 4)。坡度从 8.7%~46.6%,细根的变化比中根和粗根更显著。为了研究根系对土壤侵蚀的影响,分别对根系直径和根系密度进行相关性分析(表 2),结果表明,土壤侵蚀与 0—40 cm 土层深度的根系密度呈正相关。根系的分布直接影响土壤侵蚀量,在不同坡度下,土壤侵蚀量随根系密度的增加而减小(图 5)。Zhang 等^[19]得出类似的结果,即侵蚀量的减少主要存在于 0~0.5 kg/m³ 的根系密度区间,这个根系质量密度区间的平均侵蚀量是裸坡侵蚀量的 1/2;当根系密度为 0.5~1.0 kg/m³ 时,侵蚀量进一步下降,平均侵蚀量约为裸坡侵蚀量的 1/3;当根系密度>1.0 kg/m³ 时,土壤侵蚀速率更低并逐渐趋于稳定。

刺槐林地不同直径根系在细根($D<1.0$ mm)、中根($1.0<D<5.0$ mm)和粗根($D>5.0$ mm)的平均分布比例分别为 41.9%,38.2%和 19.9%。表层土壤中细根所占比例大于中根和粗根。土壤侵蚀量与 0—20 cm 土层细根根系质量密度和 0—10 cm 土层中根根系质量密度显著相关(表 2),即 0—20 cm 土层细根和 0—10 cm 土层中根能有效地减少土壤侵蚀。这主要是由于根系可以降低土壤容重,增加土壤孔隙度,进而促进水分入渗,减少径流量^[20]。研究结果证实了 De 等^[11]的观点,即植物根系通过增加表土阻力,在防止地表径流对土壤侵蚀方面起着核心作用。

2.3 枯落物与根系对土壤侵蚀的贡献率

裸坡、有枯落物覆盖和去除枯落物样地的土壤侵蚀速度分别为 0.39~6.37,0.25~2.04,0.31~3.27 g/L。侵蚀量随着坡度和流量的增加而增加(表 3)。与裸坡相比,有枯落物覆盖的侵蚀量减少 36%~68%(平均值为 55%),说明森林植被在黄土高原水土流失防治中占有重要地位。当坡度为 17.6%,流量为 0.5~2.0 L/s 时,植被对土壤侵蚀的减沙效应为 45%~53%,这表明刺槐在生长过程中改变土壤的入渗能力,且土壤结构、孔隙度和有机质含量也发生较大的变化,土壤团聚体呈稳定状态。



注:A、B、C、D、E 分别表示坡度为 8.7%,17.6%,26.8%,36.4%,46.6%。

图 4 不同坡度下土壤根系质量密度的垂直分布

表 2 土壤侵蚀量与根系质量密度的相关性系数			
枯落物 厚度/cm	根系质量 密度	相关 系数	<i>p</i>
0—10	根密度	0.684 **	<0.01
10—20	根密度	0.617 *	<0.05
20—30	根密度	0.346 *	<0.05
30—40	根密度	0.435	0.09
0—10	细根	0.691 *	<0.01
0—10	中根	0.433 *	<0.05
10—20	细根	0.492 *	<0.05
10—20	中根	0.358	0.06

注: ** 表示相关性极显著($p<0.01$); * 表示相关性显著($p<0.05$)。

在以往的研究中,只有地上生物量受到较大关注,地下植物组分对土壤侵蚀的影响在很大程度上被忽略。本研究结果表明,植物的地上和地下组分对土壤侵蚀均有显著影响。此外,本研究进一步分离刺槐根系和枯落物对减沙的贡献率(表 4)。根系和枯落物对减沙的贡献率分别为 21%~49%和 11%~26%,均值分别为 37%和 18%,与枯落物相比,植物根系对减沙的

贡献率更高。当坡度为 8.7%~46.6%,根系减沙的贡献率从 58%上升到 72%。3 种流量下根系对土壤侵蚀的贡献率呈抛物线趋势,当流量为 2.0 L/s 时,根系对土壤侵蚀减少的贡献率最大(表 4)。根系和枯落物对土壤侵蚀减少的贡献率平均值分别为 66%和 34%,该结果与 Zhou 等^[1]和 Zhao 等^[3]的研究结果相一致,即在枯落物移除或破坏的情况下,植物根系在控制土壤流失方面起着关键作用。

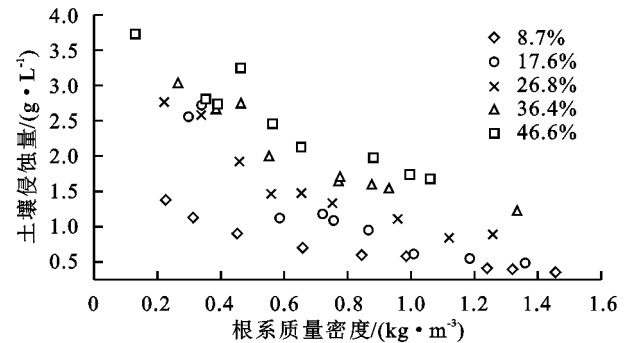


图 5 不同坡度土壤侵蚀量和根系质量密度的相关关系

坡度/%	流量/ (L·s ⁻¹)	侵蚀量/(g·L ⁻¹)			泥沙减少量/%		
		裸坡	有枯落物	去除枯落物	枯落物+根植被	根系	枯落物
8.7	0.5	0.39a	0.25ab	0.31b	36	21	15
	1.0	0.63a	0.34b	0.47b	46	25	21
	2.0	0.82a	0.43b	0.62c	48	24	23
	0.5	1.05a	0.58b	0.69c	45	34	10
17.6	1.0	1.14a	0.61b	0.77c	46	32	14
	2.0	1.39a	0.66b	0.81c	53	42	11
	0.5	1.76a	0.80b	1.26c	55	28	26
	1.0	2.28a	1.02b	1.41c	55	38	17
26.8	2.0	2.65a	1.17b	1.52c	56	43	13
	0.5	2.78a	1.24b	1.67c	55	40	15
	1.0	3.14a	1.07b	1.86c	66	41	25
	2.0	4.02a	1.36b	2.08c	66	48	18
36.4	0.5	4.36a	1.72b	2.47c	61	43	17
	1.0	5.02a	1.85b	2.92c	63	42	21
	2.0	6.37a	2.04b	3.27c	68	49	19

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

表 4 刺槐根系和枯落物对不同坡度及不同流量
土壤侵蚀减少的贡献率

坡度/ %	贡献率/%		流量/ (L·s ⁻¹)	贡献率/%	
	根	枯落物		根	枯落物
8.7	58	42	0.5	67	33
17.6	64	36	1.0	63	37
26.8	66	34	2.0	70	30
36.4	67	33			
46.6	72	28			

2.4 土壤可蚀性与土壤临界剪切力

土壤可蚀性和临界剪切力与土壤侵蚀密切相关，是表征土壤抗侵蚀能力的重要指标。有枯落物覆盖植被、去除枯落物植被和裸坡的土壤侵蚀速率与剪切力的关系见图 6。从图 6 可以看出，土壤侵蚀速率与剪切力呈简单线性相关($p>0.75$)。裸坡的土壤可蚀性为 1.000 9，分别是去除枯落物植被和有枯落物覆盖植被的 2.95, 4.98 倍。植物根系对土壤可蚀性的影响大于枯落物。有枯落物覆盖植被、去除枯落物植被和裸坡的临界剪切力分别为 4.378, 3.823, 1.136 Pa。与裸坡相比，有枯落物覆盖植被和去除枯落物植被临界剪切力分别提高 285% 和 237%。结果表明，植被可以通过枯落物和根系对土壤可蚀性和临界剪切力的直接或间接作用来抑制土壤侵蚀。与裸坡相比，有枯落物覆盖植被和去除枯落物植被土壤可蚀性显著下降，临界剪切力显著增加，但根系对土壤可蚀性降低的影响远大于枯落物，这表明根系比枯落物对侵蚀量减少的贡献率更大。

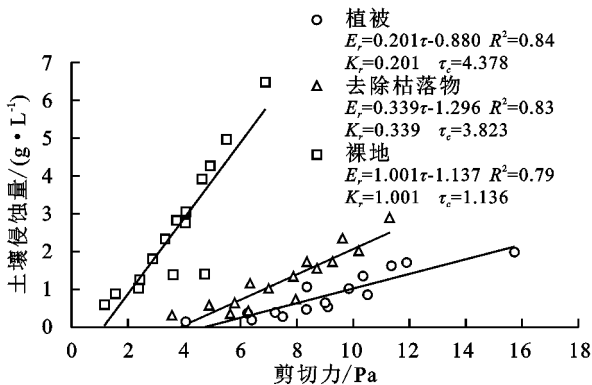


图 6 土壤侵蚀量与剪切力的关系

有枯落物覆盖植被和去除枯落物植被土壤可蚀性和临界剪切力的差异是由于枯落物可间接影响土壤性质，枯落物增加土壤粗糙度和入渗速率，从而增加土壤含水量，降低侵蚀强度^[3]。根系与土壤颗粒结合可以加固土壤，形成稳定的团聚体，增强土壤的凝聚力。因此，根系和枯落物对土壤可蚀性降低和临界剪切力增加均起着积极作用。

3 结论

- (1)土壤侵蚀量随枯落物厚度的增加而减小，至枯落物厚度达到 3 cm 时趋于稳定。
 - (2)土壤侵蚀量随根系质量密度的增加呈指数下降趋势，当根系质量密度为 0~0.5 kg/m³时，土壤侵蚀量约为裸坡侵蚀量的 1/2；当根系密度>0.5 kg/m³时，土壤侵蚀量减小幅度较小直至趋于稳定；通过相关性分析发现，0—20 cm 土层细根和 0—10 cm 土层中根与土壤侵蚀显著相关，研究结果确定根系质量密度和根径在土壤侵蚀中的重要作用。
 - (3)与裸坡相比，刺槐林地土壤侵蚀量减少 55%，且根系减沙的贡献率高于枯落物。
 - (4)刺槐林地的土壤可蚀性和临界剪切力受枯落物和根系的影响极为显著，枯落物和根系通过直接或间接作用降低土壤可蚀性，增加土壤剪切力，进而增强土壤的抗侵蚀能力。
- 研究结果对于揭示黄土高原地区森林植被对土壤侵蚀影响及其作用机制具有重要意义。

参考文献：

[1] Zhou Z C, ShangGuan Z P. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. Pedosphere, 2008, 18 (1):131-136.

[2] Li X, Niu J Z, Xie B Y, et al. The effect of leaf litter cover on surface runoff and soil erosion in Northern China[J]. PLoS One, 2014, 9(9):e107789.

[3] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, et al. The contribution of *Astragalus Adsurgens* roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation and Development, 2017, 28(1):265-273.

[4] 陈春良, 鲍凯强, 王梦莹, 等. 植被去除对侵蚀环境土壤有机质和养分的影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5):1-6.

[5] Brown L C, West L T, Beasley D B, et al. Rill erosion one year after incorporation of crop residue[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(5):1531-1540.

[6] Knapen A, Poesen J, Baets S D. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2):425-440.

[7] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et al. Soil detachment by shallow flow[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(2):351-357.

[8] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3):713-719.

[9] Zhang G H, Liu G B, Tang K M, et al. Flow detach-

ment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China[J].Transactions of the ASAE,2008,51(3):883-890.

[10] Steffen S, Philipp G, Pascale Z, et al. The influence of leaf litter diversity and soil fauna on initial soil erosion in subtropical forests[J].Earth Surface Processes and Landforms,2015,40(11):1-10.

[11] De B S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J].Earth Surface Processes and Landforms,2007,32(9):1323-1345.

[12] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J].Progress in Physical Geography,2005,29(2):189-217.

[13] Pan C, ShangGuan Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J].Journal of Hydrology,2006,331(1/2):178-185.

[14] Sun L, Zhang G H, Liu F, et al. Effects of incorporated plant litter on soil resistance to flowing water erosion in the Loess Plateau of China[J].Biosystems Engineering,2016,147:238-247.

[15] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hill slope[J].Earth Surface Processes and Landforms,1999,24(8):677-686.

[16] Dunne T, Dietrich W E, Brunengo M J. Recent and past erosion rates in semi-arid Kenya[J].Zeitschrift für Geomorphologie,1978,29:130-140.

[17] Snelder D J, Bryan R B. The use of rainfall simulation tests to assess the influence of vegetation density on soil loss on degraded rangelands in the Baringo District, Kenya[J].Catena,1995,25(1):105-116.

[18] Poesen J W, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: A review[J].Catena,1994,23(1/2):141-166.

[19] Zhang G H, Tang K, Ren Z, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J].Transactions of the ASAE,2013,56(3):927-934.

[20] 李勇,徐晓琴,朱显谟.黄土高原油松人工林根系改善土壤物理性质的有效性模式[J].林业科学,1993,29:193-198.

(上接第 82 页)

[12] 杨诗秀,雷志栋.水平土柱入渗法测定土壤导水率[J].水利学报,1991(5):1-7.

[13] 古莱姆拜尔·艾尔肯,虎胆·吐马尔白,吴永涛.不同粒径沙壤土水分扩散率测定[J].新疆农业大学学报,2015,38(5):426-430.

[14] 范严伟,黄宁,马孝义,等.应用 HYDRUS-1D 模拟砂质夹层土壤入渗特性[J].土壤,2016,48(1):193-200.

[15] 曲芷程,栗云召,于君宝,等.黄河口湿地典型植物群落土壤水、盐入渗过程模拟[J].生态学杂志,2022,41(5):903-911.

[16] 胡传旺,王辉,刘常,等.南方典型土壤水力特征差异性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):97-102.

[17] 苏帅,杨永刚,黄磊.矿区生态修复过程中不同立地类型土壤水动力学特性[J].水土保持通报,2018,38(1):18-23.

[18] 马美红,张书函,王会肖,等.非饱和土壤水分运动参数的确定:以昆明红壤土为例[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(1):38-42.

[19] 单鱼洋,马晨光,王全九,等.羧甲基纤维素钠对壤砂土水分运动及水力参数的影响[J].土壤学报,2022,59(5):1349-1358.

[20] 赵炜.水煤浆气化渣对风沙土改良效果与作物生长响应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.

[21] 邓建才,卢信,陈效民,等.封丘地区土壤水分扩散率的研究[J].土壤通报,2005,36(3):317-320.

[22] 秦耀东.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2003.

[23] 魏飒,任树梅.承德围场地区土壤水分扩散率的研究[J].中国农村水利水电,2007(1):55-56,61.

[24] 王佳坤,郭月峰,祁伟,等.内蒙古砒砂岩土壤水平入渗特性及适用模型研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2021,42(5):46-52.