

黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力

孙 龙^{1,2}, 张光辉^{1,3*}, 王 兵⁴, 栾莉莉³

- (1. 中国科学院水利部水土保持研究所/黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
2. 中国科学院生态环境研究中心/城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;
3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;
4. 西北农林科技大学水土保持研究所/黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘 要: 为了明确黄土高原植被恢复后不断蓄积的枯落物对土壤分离过程的影响, 论文选取 10、15、20、30、40a 退耕年限刺槐林样地及对照样地, 采集 180 个土壤样品用于土壤分离试验, 在 6 组侵蚀动力条件下进行变坡水槽冲刷试验, 结果表明: 随着退耕年限的增大, 刺槐林土壤结构趋于稳定且疏松多孔, 40 年刺槐林地与对照样地相比: 容重降低 12.9%、总孔隙度增加 10.1%、毛管孔隙度增加 62.4%, 土壤有机质含量增加 97.9%、水稳性团聚体增加 112.3%。土壤分离能力均值随着林龄呈指数函数递减 ($R^2 = 0.82$ 、 $P < 0.05$)。在退耕 0~40 年范围内, 在 0~15 a 内土壤分离能力下降迅速, 对照、10 a 刺槐林地、15 年刺槐林地之间的土壤分离能力差异显著 ($P < 0.05$), 退耕 15 a 以后土壤分离能力趋于稳定。40 a 林龄刺槐林细沟可蚀性比对照的细沟可蚀性降低 86.3%, 临界剪切力提高 10.1%。土壤临界剪切力变化范围在 4.15~4.78 Pa 之间。细沟可蚀性的变化趋势与土壤分离能力变化趋势相似, 相比临界剪切力的变化, 细沟可蚀性的变化更能反映土壤分离能力的变化情况。

关键词: 侵蚀; 试验; 土壤; 黄土高原; 退耕还林; 土壤分离能力; 细沟可蚀性; 临界剪切力

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.025

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-10-0191-07

孙 龙, 张光辉, 王 兵, 栾莉莉. 黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 191-197. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.025 http://www.tcsae.org

Sun Long, Zhang Guanghui, Wang Bing, Luan Lili. Soil erosion resistance of black locust land with different ages of returning farmland on Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 191-197. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.025 http://www.tcsae.org

0 引 言

土壤侵蚀过程包括土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积^[1-3]。土壤分离是指土壤颗粒在雨滴击溅或径流冲刷作用下脱离土体、发生位移的过程^[4]。由径流冲刷引起的土壤分离导致的细沟侵蚀是坡面侵蚀泥沙的主要来源^[5-7]。径流冲刷引起的土壤分离过程主要通过土壤分离能力、土壤侵蚀阻力(细沟可蚀性、土壤临界剪切力)来定量表征^[8-10], 受土壤近地表特性(土壤性质、根系、植被、枯落物、结皮等)的显著影响^[11-12]。

随着黄土高原植被群落的逐渐恢复, 近地表特性(根系、枯落物、结皮等)显著改变, 土壤分离过程可能受到由不同近地表特性构成的多种系统的影响, 如“根系-土壤”系统^[9]、“生物结皮-土壤”系统^[13]、“枯落物-土壤”系统^[14]等。对于“根系-土壤”系统, Wang 等^[15]研究了不同退耕年限(3~37a)草地的土壤分离过程, 结果表明随着退耕年限的增加, 由于根系系统显著发育导致土壤

侵蚀阻力逐渐增大。后续 Zhang 等^[9]、Yu 等^[16]的研究进一步证明了“根系-土壤”系统具有较高土壤侵蚀阻力。Liu 等^[13]研究了典型生物结皮盖度对土壤分离的影响, 结果表明生物结皮的覆盖可有效增大土壤侵蚀阻力。Wang 等^[11]对黄土高原自然演替 7a 草地的研究表明, 自然恢复草地的土壤分离能力与对照相比降低了 98.9%, 其中根系、“茎秆-枯落物”系统和生物结皮的贡献率分别为 53.7%、30.3%和 14.9%。

不同于表土根系丰富的草地, 林地因其枯落物的显著蓄积会抑制植被萌发生长^[17], 导致林下存在很多无根区域。而枯落物不仅能够在地表蓄积, 还能通过降雨击溅、泥沙沉积、土栖动物活动等过程混入表土^[14,19], 进而导致刺槐林地表土中不同程度地混合有枯落物^[18-19], 但目前关于“枯落物-土壤”系统对土壤分离过程影响的研究甚少。近期, Li 等^[18]在黄土高原纸坊沟小流域退耕约 20 年刺槐林地的研究表明, 表土中枯落物密度与土壤分离能力间呈显著负相关。Sun 等^[19]的试验结果表明混合于表土中的枯落物能够显著提高土壤侵蚀阻力, 降低土壤分离能力。一方面, 混入表土的枯落物能够通过其物理作用(类似于根系的物理网络和捆绑作用)提高土壤稳定性^[11,19]。另一方面, 枯落物会逐渐分解释放有机物质, 从而改变土壤性质, 进而影响土壤分离过程^[17-18,20-23], 且随着枯落物的分解其自身的物理特性也会发生变化,

收稿日期: 2016-09-05 修订日期: 2017-04-05

基金项目: 中国科学院“百人计划”; 国家自然科学基金(41530858, 41271287)

作者简介: 孙 龙, 男, 山东临沂人, 博士, 博士后, 主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。北京 中国科学院生态环境研究中心, 100085。

Email: lsun@rcees.ac.cn

*通信作者: 张光辉, 男, 甘肃静宁人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。北京 北京师范大学, 100875。Email: ghzhang@bnu.edu.cn

进而间接导致其物理作用的改变。

随着黄土高原“退耕还林还草工程”的有效实施,入黄泥沙显著减少,研究植被群落近地表特性对土壤侵蚀阻力的影响及其机制十分必要,而在长时间尺度下,“枯落物-土壤”系统对土壤侵蚀阻力的影响机制尚不明确。本文通过选取不同退耕年限刺槐林地进行径流冲刷试验,明确“枯落物-土壤”系统土壤侵蚀阻力随退耕年限的变化规律,研究结果有助于退耕条件下土壤侵蚀过程的理解与模拟和水土保持效益评估。

1 材料与方法

1.1 样地选取

刺槐因生长快、固氮能力强且适应干旱环境而被广泛用于黄土高原植被恢复。随着刺槐林地的逐渐恢复,枯落物蓄积量显著增加^[24-25],进而可能对土壤侵蚀过程产生影响。本研究在黄土高原安塞县纸坊沟小流域选取林龄分别为10、15、20、30、40a的刺槐林地以及玉米样地(0年,作为对照),样地选取时间为2015年6月至7月。为了最大限度降低根系对试验结果的影响,采集土样时尽量避免可见根系。所选样地均为黄绵土,黄绵土质地均一,均为粉砂壤土,且退耕前均为玉米地,耕作方式相近,因此认为具有可比性,样地位置如图1,样地基本信息见表1。

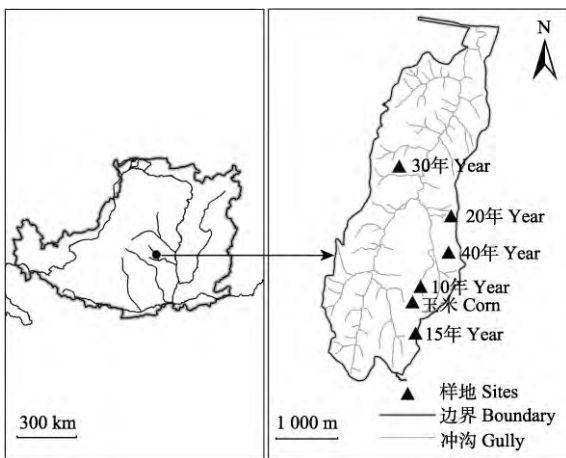


图1 黄土高原样地布设示意图

Fig.1 Schematic diagram of survey sites

表1 取样点基本信息

Table 1 Basic information of sampling sites

样地 Sites	林龄 Age/a	海拔 Altitude/m	坡位 Location	坡向 Aspect	坡度 Gradient/(°)	主要林下植被 Dominant plant
玉米 Corn	0	1324	梁卯坡	东北	16	玉米
	10	1301	梁卯坡	东	22	狗尾草、猪毛菜
	15	1309	梁卯坡	东南	18	艾蒿、狗尾草
刺槐 Black locust	20	1257	梁卯坡	西南	21	艾蒿、铁杆蒿、狗尾草
	30	1203	梁卯坡	东南	26	长芒草、臭草
	40	1236	梁卯坡	西	33	长芒草、铁杆蒿、艾蒿

1.2 样品采集

将内径10 cm、高5 cm的不锈钢环刀垂直压入土壤,

当采样环被土壤充分填满时,盖上采样环上面的盖子,用剖面刀将采样环剖出,然后慢慢削去采样环底部多余的土壤,放上棉布,再盖上采样环下面的盖子,下盖带有小孔用于吸排水,并进行标码。每个样地采集土样30个,共计采集180个土样用于土壤分离试验,土样采集时间为2015年8月。

同时现场测定土壤黏结力,并取土样带回实验室测定土壤水分、容重、土壤质地、黏结力、团聚体、有机质、孔隙度等土壤理化参数^[5,26]。同时调查地表枯落物蓄积量和表土中枯落物密度。土壤水分测定采用环刀(容积100 cm³)取样烘干法,将6个土样含水量的均值作为采样点的初始土壤含水量,用于计算土样冲刷前的质量。土壤容重也采用环刀(容积100 cm³)取样烘干法,重复6次。土壤质地测定采用激光粒度仪法,重复4次。土壤黏结力采用便携式黏结力仪(Durham Geo-enterprises, Inc., UK)测定,重复12次,去掉最大值和最小值,取其均值作为该样地的土壤黏结力。水稳性团聚体的测定采用湿筛法,重复3次。土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定,重复4次。土壤孔隙度的测定采用环刀浸透法,重复5次^[26]。枯落物蓄积量测定采用标准样方调查法,在每个采样点均匀布设9个1 m²样方,收集地表蓄积的枯落物,于65℃下烘至质量恒定并测定质量。表土中枯落物密度测定采用水洗法,额外采集与用于土壤分离试验样品相同的土样15个,置于1 mm筛上用水缓慢冲洗,将洗出的枯落物置于烘箱中在65℃下烘至质量恒定,测定质量并计算表层土壤中的枯落物密度。

1.3 土壤分离试验

利用变坡水槽模拟冲刷进行土壤分离试验(图2)。水槽长4 m、宽0.35 m、深0.3 m。水槽底部粘有一层试验用土壤,使水槽底部糙率与试验土样糙率基本一致,同时还可保持试验过程中水槽底部糙率的稳定。在距水槽出口0.5 m处设置土样放置室,直径11 cm。水槽顶端有一深度为40 cm的进水消能池。水槽下端与支座连接,水槽顶端与滑轮相连,可调节水槽坡度,变化范围为0°~25°。水流由供水系统供应,由蓄水池、沉沙池、水泵、分流箱、阀门组和输水管道组成,通过调整阀门组,可调节水槽流量。水流通过水槽后,进入沉沙池,再返回蓄水池,如此循环,为试验过程提供稳定、持续的供水。

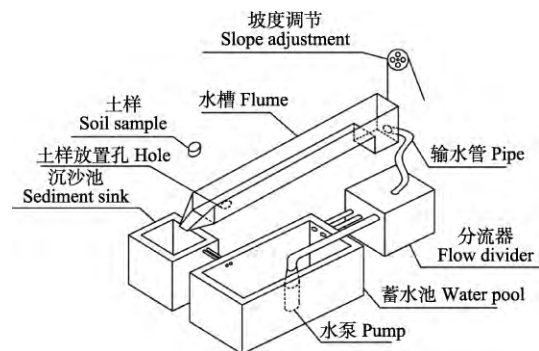


图2 水槽装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of flume

流量(Q , m³/s)由阀门组控制,变化在0.5~2.5 L/s之间。试验前调整水槽坡度和流量,待水流稳定后测定

流速，表面流速用染色法测定，记录染色水流流过距水槽下端 0.6 m 以上 2 m 长测速区所用的时间，用 2 除以时间得水流表面流速。断面平均流速根据积分中值定理计算。试验时监测水流温度，计算水流雷诺数，根据水流流态选择相应的流速修正系数计算水流平均流速 (v , m/s)^[27]。平均水深 (h , mm) 用流量、流速以及水槽宽 (B , m) 的关系式 (公式 1) 计算。根据测定的平均流速、坡度 (S , sin 值) 和计算出的平均水深，结合水的密度 (ρ , kg/m³)，通过公式 (2) 计算每次试验时的水流剪切力 (τ , Pa)。

$$h = \frac{Q}{Bv} \quad (1)$$

$$\tau = \rho ghS \quad (2)$$

试验前对试验土样进行饱和，将土样静置于水中，维持水面在土样表面 1 cm 以下，8 h 后取出土样，于阴凉处排水 12 h 后用于冲刷试验。冲刷试验设定 6 组坡度-流量组合 (10°-1.0 L/s、10°-2.0 L/s、15°-2.0 L/s、25°-1.5 L/s、25°-2 L/s、25°-2.5 L/s)，得到 6 个不同的水流剪切力 (5.4~17.4 Pa)，每组坡度、流量组合下重复冲刷 5 个土样。待土样冲刷大约 2 cm 深度时停止冲刷试验，记录冲刷时间。将冲刷后的土样放置于烘箱，105 °C 下烘至质量恒定。冲刷过程中在水槽出水口处安置 1 mm² 网眼的网兜收集被冲刷的枯落物，并置于烘箱，于 65 °C 下烘至质量恒定并测定质量。土样冲刷前的干质量用前期土壤含水量标定。土壤分离能力的计算公式为：

$$D_c = \frac{10(W_w - W_s - W_d - W_l)}{tA} \quad (3)$$

式中， D_c 为土壤分离能力，kg/(m²·s)； W_w 为土样湿质量，g； W_s 为土壤水分质量，g； W_d 为试验结束时土样干质量，g； W_l 为被冲刷出的枯落物干质量，g； t 为冲刷时间，s； A 为土样环刀面积，cm²。

土壤侵蚀阻力用于反映土壤抵抗细沟侵蚀的能力，包括土壤临界剪切力和细沟可蚀性 2 个参数。在 WEPP (water erosion prediction project) 模型中，细沟可蚀性 (K_r , s/m) 和临界剪切力 (τ_c , Pa) 被分别定义为土壤分离能力 (D_c , kg/(m²·s)) 和水流剪切力 (τ , Pa) 线性拟合直线的斜率和在 X 轴上的截距^[22]，按照下式估算：

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (4)$$

1.4 数据分析

数据的统计分析采用 SPSS 19.0 软件进行。数据的正态性检验采用柯尔莫诺夫-斯米尔诺夫 (Kolmogorov-Smirnov) 检验方法。不同样地土壤分离能力的差异性检验采用单因素方差分析方法 (one-way ANOVA)。细沟可蚀性、临界剪切力与土壤性质、枯落物之间的关系采用 Pearson 相关分析方法和曲线估计方法分析。土壤侵蚀阻力的模拟采用非线性回归方法，回归结果用模型决定系数 (R^2) 和纳什-萨克利夫模型有效性系数 (Nash-Sutcliffe model efficiency, NSE) 评估。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

不同林龄刺槐林地及对照的土壤的质地、孔隙度、容重、黏结力、有机质、水稳性团聚体、枯落物的变化情况如表 2 所示。土壤质地反映了土壤基本颗粒组成。土壤总孔隙度、容重、黏结力反映了土壤密实状况。土壤毛管孔隙度、有机质、水稳性团聚体反映了土壤结构状况。

由表 2 可知，在林龄 40a 内的刺槐林地，土壤砂粒、粉粒、黏粒的比例 (质量分数) 基本一致，总体而言，不同林龄刺槐林地的土壤质地比较均一。其中砂粒、粉粒、黏粒质量分数的变化范围分别为 25.6%~31.7%、60.4%~64.3%、7.9%~10.9%。

由表 2 可知，随着林龄的增大，刺槐林地土壤毛管孔隙度和总孔隙度都有明显的增加趋势。与玉米对照相比，退耕 40a 刺槐林林地的毛管孔隙度增加 62.4%、总孔隙度增加 10.1%。

表土容重随着林龄的增大逐渐减小，可能是由于枯落物分解、土栖动物活动等作用导致土壤结构改善、孔隙度增大的结果，孔隙度与容重相反的变化趋势也说明了这一点。与玉米对照相比，退耕 40a 刺槐林林地的土壤容重减小 12.9%。

由表 2 可知，土壤黏结力的变化表现为先增大后减小。最大值为退耕 10 年的 6.72 kPa，最小值为退耕 40a 的 6.12 kPa。

由表 2 可知，随着林龄的延长，土壤有机质逐渐增加。40a 林龄的刺槐林比玉米对照的土壤有机质增加了 97.9%。

表 2 不同样地土壤属性和枯落物密度

Table 2 Soil properties and plant litter amount of different sites

样地 Sites	林龄 Age/a	砂粒质 量分数 of sand/%	粉粒质 量分数 of silt/%	黏粒质 量分数 of clay/%	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	容重 Soil bulk density/(kg·m ⁻³)	黏结力 Soil cohesion/kPa	土壤有机质 量分数 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	水稳性团聚体 Water stable aggregate/%	表土中枯落物 密度 Litter density in soil/(kg·m ⁻²)	枯落物蓄积量 Plant litter accumulation/ (kg·m ⁻²)
玉米 Corn	0	10.9	63.5	25.6	49.44±1.44a	11.04±0.53a	1196.8±30.6a	6.25±0.42ab	7.99±0.05a	31.79±1.62a	0	0
	10	10.3	62.5	27.2	51.45±1.47ab	11.97±1.82ab	1196.8±30.6a	6.72±0.37c	9.46±0.05b	46.54±2.31b	0.07±0.044a	0.33±0.138a
刺槐 Black locust	15	9.7	63.3	27.0	53.90±3.50c	13.04±1.35bc	1173.8±43.16a	6.66±0.35cd	9.78±0.06c	47.15±2.68b	0.18±0.120ab	0.49±0.216b
	20	9.6	63.4	27.0	53.31±1.79bc	14.21±1.17c	1134.3±36.7ab	6.55±0.39ac	12.31±0.06d	53.74±2.81c	0.32±0.188bc	0.60±0.198c
	30	9.4	64.3	26.3	54.18±2.87c	17.04±1.67d	1104.7±60.0bc	6.37±0.34ad	13.82±0.01d	67.47±3.09d	0.29±0.211cd	0.71±0.223c
	40	7.9	60.4	31.7	54.45±1.75c	17.93±2.31d	1074.0±59.1cd	6.12±0.44bd	14.73±0.03e	64.00±3.13e	0.17±0.132de	0.80±0.301ab

注：不同字母代表在 $P < 0.05$ 水平上差异性显著

Note: Different letters denote the significant differences at $P < 0.05$

表 2 显示了水稳性团聚体 (质量分数) 随林龄的变化趋势。最大值为 30a 林龄的刺槐林地的 67.47%, 比玉米对照增大 112.3%。总体上随着林龄的增大, 水稳性团聚体逐渐增加。40a 林龄的刺槐林地, 其水稳性团聚体略低于 30a 林龄的刺槐林地。

枯落物蓄积量整体上随着林龄的增长呈增大趋势, 并有趋于稳定的态势。不同林龄刺槐林枯落物蓄积量的差异显著性, 相邻的林龄处理之间差异不显著, 10a 与 20a 相比差异显著, 但 20a 与 30a、30a 与 40a 差异不显著, 说明退耕 30a 后枯落物的蓄积比前 20a 缓慢。林龄为 10、15、20、30、40a 的刺槐林枯落物蓄积量分别是 0.33、0.49、0.60、0.71、0.80 kg/m², 均值为 0.59 kg/m²。Logistic 生长曲线能很好地模拟枯落物蓄积量 (L_a , kg/m²) 与林龄 (t_a) 的关系:

$$L_a = -0.00032 + \frac{0.95568}{\left(1 + \frac{t_a}{14.68047}\right)^{-1.59481}}, \quad R^2 = 0.99, P < 0.001. \quad (5)$$

林龄为 10、15、20、30、40a 的刺槐林其 0~5 cm 表土中枯落物密度分别为 0.07、0.17、0.32、0.29、0.17 kg/m², 均值为 0.20 kg/m²。其中 20a 林龄的刺槐林表土中枯落物密度与以往的研究结果一致^[18]。表土中枯落物密度 (L_d , kg/m²) 与林龄 (t_a) 的关系可以用 S 型曲线模拟, 并在退耕约 20a 后趋于稳定值 0.26 kg/m²:

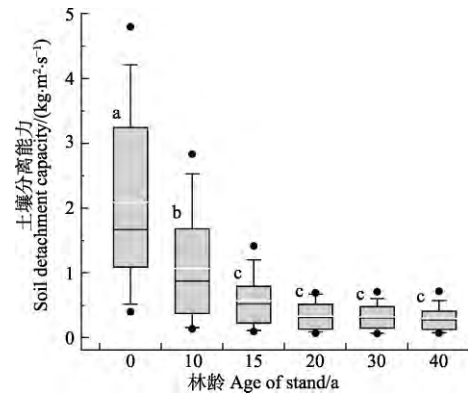
$$L_d = \frac{0.26}{1 + \exp\left(-\frac{x - 12.69}{2.04}\right)}, \quad R^2 = 0.82, P = 0.074 \quad (6)$$

2.2 土壤分离能力

图 3 中箱形图中间的黑线代表中值、白线代表均值、上下分位线分别代表 95% 和 5% 分位数, 黑点表示分位线以外的值, 不同箱形图标注的字母代表处理间的差异性, 图例前的字母代表枯落物种间的差异分析结果。玉米地及不同林龄刺槐林 (10、15、20、30、40a) 土壤分离能力变化范围分别是 0.49~3.93、0.13~1.89、0.08~1.05、0.07~0.60、0.04~0.56、0.05~0.55 kg/(m²·s), 土壤分离能力均值分别为 2.07、1.04、0.54、0.31、0.29、0.27 kg/(m²·s)。与对照 (玉米地) 相比, 10~40a 林龄刺槐林地土壤分离能力分别降低了 49.8%、73.9%、85.0%、86.0%、87.0%。随着退耕年限的延长或林龄的增加, 土壤分离能力显著降低, 土壤分离能力均值 (D_c , kg/(m²·s)) 随着林龄 (t_a) 的增大呈指数函数递减:

$$D_c = 0.205 + 1.882 \exp(-0.103t_a), \quad R^2 = 0.97, P = 0.006 \quad (7)$$

林龄为 0~15a 之间的刺槐林地, 其土壤分离能力随着林龄的增加迅速降低, 对照、10a 刺槐林地、15a 刺槐林地之间的土壤分离能力差异显著。退耕 15a 以后土壤分离能力趋于稳定, 退耕 15、20、30、40a 刺槐林土壤分离能力差异不显著。说明枯落物对土壤分离能力的影响在这一时段内的变化较小或者处于动态平衡状态, 即覆盖、混合、分解 3 方面作用对土壤分离能力的共同影响处于相对稳定的阶段。



注: 不同字母代表在 $P < 0.05$ 水平上差异性显著
Note: Different letters denote the significant differences at $P < 0.05$

图 3 不同林龄刺槐林地土壤分离能力
Fig.3 Soil detachment capacity of different aged black locust

2.3 土壤侵蚀阻力

土壤侵蚀阻力包含细沟可蚀性和土壤临界剪切力。对照及 5 种林龄刺槐林细沟可蚀性变化 (表 3), 最大值为玉米对照的 0.29 s/m, 最小值为 40a 林龄刺槐林的 0.04 s/m。40a 林龄细沟可蚀性比玉米对照的细沟可蚀性降低 86.3%。细沟可蚀性受多种因素影响。相关分析显示, 细沟可蚀性与土壤容重、有机质、水稳性团聚体、枯落物蓄积量、表土枯落物密度显著相关, 其中与枯落物蓄积量的显著水平为 $P = 0.01$, 其他因子显著水平为 $P = 0.05$ 。细沟可蚀性与黏结力相关性不显著。细沟可蚀性 (K_r , s/m) 随着林龄 (t_a) 的变化可用指数函数很好地模拟:

$$K_r = 0.024 + 0.270 \exp(-0.091t_a), \quad R^2 = 0.98, P = 0.004 \quad (8)$$

表 3 不同林龄刺槐林的土壤侵蚀阻力
Table 3 Soil erosion resistance of different aged black locust stands

处理 Treatments	林龄 Age/ a	回归方程 Regression function	细沟 可蚀性 Rill erodibility (s·m ⁻¹)	临界 剪切力 Critical shear stress /Pa	R^2	纳什 系数 Nash-Sutcliffe efficiency coefficient
玉米对照 Corn	0	$D_c = 0.2900\tau - 1.2024$	0.29	4.15	0.99	0.99
	10	$D_c = 0.1551\tau - 0.7100$	0.16	4.58	0.99	0.99
刺槐林 Black locust	15	$D_c = 0.0818\tau - 0.3811$	0.08	4.66	0.98	0.98
	20	$D_c = 0.0471\tau - 0.2250$	0.05	4.78	0.96	0.96
	30	$D_c = 0.0436\tau - 0.2018$	0.04	4.63	0.98	0.98
	40	$D_c = 0.0397\tau - 0.1814$	0.04	4.57	0.97	0.97

注: D_c 为土壤分离能力, kg·m⁻²·s⁻¹; τ 为水流剪切力, Pa。

Note: D_c is soil detachment capacity, kg·m⁻²·s⁻¹; τ is shear stress, Pa.

临界剪切力 (表 3) 最大值为 20a 林龄刺槐林的 4.78 Pa, 最小值为玉米对照的 4.15 Pa。40a 林龄土壤临界剪切力比玉米对照的临界剪切力提高 10.1%。相关分析显示临界剪切力只与表土中枯落物密度在 $P = 0.05$ 水平上显著相关。进一步回归分析表明临界剪切力随着表土中枯落物密度的增加呈线性函数增加 ($R^2 = 0.67$, $P = 0.046$)。说明在本研究中, 随着退耕年限的延长, 土壤临界剪切力的变化主要受表土中枯落物密度的影响。随着退耕年限增加,

细沟可蚀性的变化趋势与土壤分离能力变化趋势相似, 相比临界剪切力的变化, 细沟可蚀性的变化更能反映土壤分离能力的变化情况。临界剪切力 (τ_c , Pa) 随着林龄 (t_a , yr) 的变化可用 S 型曲线较好地模拟, 并在退耕 15 年后趋于稳定值为 4.66 Pa:

$$\tau_c = \frac{4.66}{1 + \exp\left(-\frac{x+8.57}{4.09}\right)}, R^2 = 0.89, P = 0.038 \quad (8)$$

3 讨 论

总体而言, 土壤随着刺槐林龄的增加趋于疏松、多孔、有机质含量升高且结构更为稳定。土壤黏结力的变化趋势通常与容重变化趋势一致, 但本研究中黏结力的变化趋势与土壤容重的变化趋势并不一致, 说明土壤固化过程并不是引起土壤黏结力变化的主要因子。枯落物混入表土通常可以提高土壤黏结力^[19], 因此, 黏结力的增加(表 2)可能是由于枯落物混合导致的。而随着林龄的增大, 表土中枯落物密度随之增加(表 2), 但并不能继续提高土壤黏结力(表 2), 甚至退耕 40a 刺槐林地的黏结力小于玉米地对照, 可能的原因是玉米地土壤在降雨打击作用下会充分固化, 同时物理结皮也会得到充分发育, 而林地表层土壤因林冠和枯落物的覆盖土壤固化过程较弱, 同时枯落物分解等作用导致土壤逐渐趋于疏松多孔, 因此土壤黏结力趋于减小。有机质和水稳性团聚体随着林龄的变化趋势类似, 这一结果部分证实了过去的研究结论, 即有机质的增加能够增强土壤的团聚性、增强土壤结构的稳定性, 也增加了毛管孔隙度。

40a 林龄的刺槐林地, 其水稳性团聚体略低于 30a 林龄的刺槐林地, 可能是由样地坡面的坡向差异造成的, 30a 林龄样地坡向为东南, 40a 林龄样地坡向为西。从表 2 可以看出, 40a 林龄刺槐林地土壤黏粒含量低于其他林地, 这可能是一方面原因。另一方面, 40a 林龄刺槐林地为阴坡, 30a 林龄的刺槐林地为阳坡, 且坡度缓于 40a 林龄刺槐林地, 因此可能导致或部分导致 30 年林龄的枯落物分解等生物化学作用, 对土壤性质的影响程度略大于 40a 林龄的刺槐林地。在植被恢复初期, 枯落物蓄积量快速增加, 然后增加速度趋于减小, 这一结果与 Olson^[28]、Ma 等^[29]的研究结论一致。栾莉莉等^[25]研究了黄土丘陵区枯落物蓄积量沿降水梯度的分布特征, 结果表明 15 年林龄的刺槐林枯落物蓄积量变化范围是 0.44~0.84 kg/m², 本研究 15a 林龄刺槐林地枯落物蓄积量在这一范围内。刘宇等^[30]在晋西黄土丘陵区调查的 22a 林龄刺槐林地枯落物为 0.68 kg/m², 略高于本研究 20a 林龄刺槐林地的 0.60 kg/m²。

通常情况下, 细沟可蚀性与土壤容重间呈负相关关系, 因为容重越大, 土壤侵蚀阻力越大, 越不容易被分离^[31]。但本研究中细沟可蚀性与容重存在较好的正相关关系, 显然与之前的认识不符。容重受到了枯落物混合及枯落物分解作用的影响而逐渐降低, 而容重的这种降低作用并没有直接导致细沟可蚀性的增大, 说明其他因

子对细沟可蚀性的影响大于容重, 即在枯落物混入表土条件下, 土壤容重不再是影响细沟可蚀性的主导因子。

根系对土壤性质的影响包括物理网络、生物化学 2 方面的作用^[11]。而枯落物混入表土对土壤性质的影响也不能简单等同于根系的物理网络作用。因为根系可以在土壤大孔隙间发育, 通过根系的物理捆绑作用和化学胶合作用增强土壤结构稳定性^[11]。而从长期来看, 枯落物则通过分解作用释放有机物质增加土壤孔隙、降低土壤容重、改善土壤结构。因此枯落物对土壤性质影响的内在机制不同于根系。Wang 等^[15]研究了黄土高原不同退耕年限的草地土壤分离过程的变化, 发现细沟可蚀性随着退耕年限逐渐降低, 且在退耕年限超过 28a 后趋于稳定, 其中退耕 28a 和 37a 的草地细沟可蚀性均为 0.003 s/m, 相比农地对照的 0.116 s/m 降低 97.4%。而本研究中退耕 30a 和 40a 刺槐林地的细沟可蚀性均为 0.04 s/m, 相比农地对照的 0.29 s/m 降低 86.3%。可见枯落物与根系均能显著降低细沟可蚀性, 提高土壤侵蚀阻力。然而不难发现, 2 个研究的农地对照细沟可蚀性处在同一数量级, 但是根系降低细沟可蚀性的作用比枯落物要大一个数量级。

4 结 论

1) 随着退耕年限的增大, 刺槐林土壤结构趋于稳定且疏松多孔, 40 年刺槐林地相比对照样地容重降低 12.9%、孔隙度增大(总孔隙度增大 10.1%、毛管孔隙度增大 62.4%), 土壤有机质含量升高 97.9%、水稳性团聚体增加 112.3%。

2) 土壤分离能力均值随着林龄的增大呈指数函数递减 ($R^2 = 0.82$ 、 $P = 0.013$)。在退耕 40 年内, 前 15 年土壤分离能力下降迅速, 对照(0 年)、10 年刺槐林地、15 年刺槐林地之间的土壤分离能力差异显著, 退耕 15 年以后土壤分离能力趋于稳定。40 年林龄刺槐林细沟可蚀性比玉米对照的细沟可蚀性降低 86.3%, 临界剪切力提高 10.1%。土壤临界剪切力变化范围在 4.15~4.78 Pa 之间。

3) 相比对照, “枯落物-土壤”系统具有较大的土壤侵蚀阻力。但从相近的退耕年限来看, 其土壤侵蚀阻力低于“根系-土壤”系统, 因此在相同侵蚀力条件下(如覆盖在地表枯落物被风力、径流等外力搬移后), “枯落物-土壤”系统比“根系-土壤”系统更易于发生土壤分离。

[参 考 文 献]

- [1] Toy T J, Foster G R, Renard K G. Soil erosion: Processes, prediction, measurement, and control[M]. John Wiley & Sons, 2002.
- [2] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 395-402.
Zhang Guanghui. Advances in study of runoff detachment processes based on hydraulics[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(3): 395-402. (in Chinese with English abstract)
- [3] Lal R. Soil erosion research methods[M]. CRC Press, 1994.
- [4] Owoputi L, Stolte W. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(4): 1099-1110.

- [5] Li Zhenwei, Zhang Guanghui, Geng Ren, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129: 248–257.
- [6] Nachtergaele J, Poesen J. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion[J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53(3): 449–463.
- [7] Gysse G, Poesen J, Nachtergaele J, et al. The impact of sowing density of small grains on rill and ephemeral gully erosion in concentrated flow zones[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64(3): 189–201.
- [8] Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, Liu Guobin, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 713–719.
- [9] Zhang Guanghui, Tang Keming, Sun Zilong, et al. Temporal variability in rill erodibility for two types of grasslands[J]. *Soil Research*, 2014, 52(8): 781–788.
- [10] Knapen A, Poesen J, De Baets S. 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.
- [11] Wang Bing, Zhang Guanghui, Zhang Xunchang, et al. Effects of near soil surface characteristics on soil detachment by overland flow in a natural succession grassland[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(2): 589–597.
- [12] Wang Bing, Zhang Guanghui, Shi Yangyang, et al. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(4): 1213–1222.
- [13] Liu Fa, Zhang Guanghui, Sun Long, et al. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(7): 875–883.
- [14] Sun Long, Zhang Guanghui, Luan Lili, et al. Temporal variation in soil resistance to flowing water erosion for soil incorporated with plant litters in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2016, 145: 239–245.
- [15] Wang Bing, Zhang Guanghui, Shi Yangyang, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(14): 1725–1734.
- [16] Yu Yaochuang, Zhang Guanghui, Geng Ren, et al. Temporal variation in soil detachment capacity by overland flow under four typical crops in the Loess Plateau of China[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 122: 139–148.
- [17] Xiong Shaojun, Nilsson C. Dynamics of leaf litter accumulation and its effects on riparian vegetation: a review[J]. *The Botanical Review*, 1997, 63(3): 240–264.
- [18] Li Zhenwei, Zhang Guanghui, Geng Ren, et al. Spatial heterogeneity of soil detachment capacity by overland flow at a hillslope with ephemeral gullies on the Loess Plateau[J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 264–272.
- [19] Sun Long, Zhang Guanghui, Liu Fa, 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.
- [20] Casermeiro M, Molina J, De La Cruz Caravaca M, et al. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate[J]. *Catena*, 2004, 57(1): 91–107.
- [21] Durán Zuazo V, Rodríguez Pleguezuelo C. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(1): 65–86.
- [22] Blanco-Canqui H, Lal R. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality[J]. *Critical reviews in plant science*, 2009, 28(3): 139–163.
- [23] Karlen D, Wollenhaupt N, Erbach D, et al. Long-term tillage effects on soil quality[J]. *Soil and Tillage Research*, 1994, 32(4): 313–327.
- [24] 寇萌, 焦菊英, 尹秋龙, 等. 黄土丘陵沟壑区主要草种枯落物的持水能力与养分潜在归还能力[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1–18.
Kou Meng, Jiao Juying, Yin Qiulong, et al. Water holding capacity and potential nutrient return capacity of main herb species litter in the hill-gully Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1–18. (in Chinese with English abstract)
- [25] 栾莉莉, 张光辉, 孙龙, 等. 黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 48–53.
Luan Lili, Zhang Guanghui, Sun Long, et al. Spatial variation in water-holding properties of typical plant litters in the loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(6): 48–53. (in Chinese with English abstract)
- [26] 孙龙. 枯落物对土壤分离过程的影响及其季节变化特征[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
Sun Long. *Soil Detachment Process and Its Temporal Variation Under the Influence of Plant Litter*[D]. Beijing: University of Chinese Academy Sciences, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [27] Luk S, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow[J]. *Soil technology*, 1992, 5(4): 289–301.
- [28] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. *Ecology*, 1963, 44(2): 322–331.
- [29] Ma Yini, Filley T R, Szlavecz K, et al. Controls on wood and leaf litter incorporation into soil fractions in forests at different successional stages[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69: 212–222.
- [30] 刘宇, 张洪江, 张友焱, 等. 晋西黄土丘陵区不同人工林枯落物持水特性研究[J]. *水土保持通报*, 2013, (6): 69–74.
Liu Yu, Zhang Hongjiang, Zhang Youyan, et al. Water holding capacity characteristics under litters of different kinds of planted forests in loess hilly region of western Shanxi province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, (6): 69–74. (in Chinese with English abstract)

[31] Knapen A, Poesen J, De Baets S. Rainfall-induced consolidation and sealing effects on soil erodibility during

concentrated runoff for loess-derived topsoils[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33: 444–458.

Soil erosion resistance of black locust land with different ages of returning farmland on Loess Plateau

Sun Long^{1,2}, Zhang Guanghui^{1,3*}, Wang Bing⁴, Luan Lili³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Plant litter has been accumulated greatly along with vegetation restoration on the Loess Plateau. Besides covering soil surface, plant litter can be incorporated into topsoil under natural circumstances by soil splash, sediment deposition, and soil-dwelling animal activities. The distribution (covering soil surface or incorporated into surface soil) and the decomposition of plant litter can modify soil physical properties (including soil detachment capacity and soil erosion resistance) which are closely related to soil detachment process by overland flow. This study was conducted to investigate the effect of vegetation restoration on soil detachment process for black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) stand with different ages of returning farmland on the Loess Plateau. The experiments were performed in the Zhifanggou small watershed (36°46'28"-36°46'42"N, 109°13'46"-109°16'03"E) in August, 2015. After a complete watershed survey, altogether 6 sampling sites were selected, including 1 corn (*Zea mays* L.) field and 5 black locust stands of 10, 15, 20, 30, and 40 years. Soil samples were collected from the top 5 cm soil layer using a circular steel ring with 10.0 cm diameter and 5.0 cm depth. Soil detachment was measured in a 4.0 m long, 0.35 m wide flume. Prior to the test of soil detachment capacity, soil samples were saturated in a container for 8 h and drained for 12 h. Then the soil samples were inserted into a hole (0.5 m away from the outlet of flume) on the flume bed and were scoured by flowing water under designed flow shear stress. A total of 180 soil samples were collected from different aged black locust stands and scoured under 6 flow shear stresses. In this study, 6 combinations of flow rates and slopes were applied to obtain 6 different flow shear stresses (5.4-17.4Pa) with similar intervals. Rill erodibility is defined as the increase in soil detachment capacity per unit increase in flow shear stress. Critical shear stress is a threshold parameter defined as the value above which a rapid increase in soil detachment capacity per unit increase in shear stress occurs. When the measured detachment capacity was plotted against the flow shear stress, rill erodibility and critical shear stress could be determined from the slope of the fitted straight line and its intercept on the X axis. The results showed that the density of plant litter in 0-5 cm surface soil was 0.07, 0.18, 0.32, 0.29 and 0.17 kg/m² for 10, 15, 20, 30, and 40-year-old black locust stands, respectively, with the mean value of 0.20 kg/m². The 40-year-old black locust stands had more capillary porosities, soil organic matter, and water stable aggregates, and smaller soil bulk density. Soil detachment capacity decreased by 49.8%, 73.9%, 85.0%, 86.0%, and 87.0% for 10, 15, 20, 30, and 40-year-old black locust stands, respectively, compared to the control. The soil detachment capacity decreased significantly over time as an exponential function ($R^2=0.97$, $P=0.006$). The control (corn field) had the biggest rill erodibility (0.29 s/m), and the 40-year-old black locust stand had the smallest rill erodibility (0.04 s/m). Compared to the control, the rill erodibility for 40-year-old black locust stand was reduced by 86.3%. The black locust stand with 20 years had the biggest critical shear stress (4.78 Pa), and the control had the smallest critical shear stress (4.15 Pa). The critical shear stress increased by 10.1% for 40-year-old black locust stand compared to the control. The critical shear stress increased significantly with litter density as a linear function ($R^2=0.67$, $P=0.046$). Rill erodibility was better than critical shear stress in the respect of reflecting the variation of soil detachment. The soil-plant litter system has a larger erosion resistance to flowing water than the control. Importantly, the soil-root system may have a larger structural stability and erosion resistance to flowing water than soil-plant litter system.

Keywords: erosion; experiment; soils; Loess Plateau; farmland afforestation; soil detachment capacity; rill erodibility; critical shear stress