

2种草本植物根系对崩岗洪积扇土壤分离的影响

蒋芳市¹, 何恺文¹, 李慧¹, 林根根², 彭绍云², 岳辉², 林金石¹, 黄炎和¹

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 长汀县水土保持站, 福建 长汀 366300)

摘要: 为探讨草本植物根系对崩岗洪积扇土壤分离的影响, 以宽叶雀稗 (*Paspalum wettsteinii*) 和巨菌草 (*Pennisetum* sp.) 为研究对象, 采用变坡水槽冲刷试验, 研究种植草本植物后土壤分离的变化特征及影响因素。结果表明: 各土层平均土壤分离速率大小为裸地 ($69.93 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$) > 宽叶雀稗 ($57.42 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$) > 巨菌草 ($43.28 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$), 且不同植被土壤分离速率均随着土层的加深呈幂函数增加; 根长密度是影响土壤分离最重要的根系指标, 宽叶雀稗小区土壤分离速率随各根系参数指标的增大呈对数函数下降, 而巨菌草区则表现为幂函数下降, 体现了不同植被根系构型对土壤分离效应的差异; 2种草地土壤分离速率可以用水流剪切力、土壤抗剪强度和根长密度很好的模拟 ($\text{NSE} \geq 0.90$)。研究结果可为崩岗治理措施的配置提供科学依据。

关键词: 崩岗; 洪积扇; 土壤分离; 根系; 模拟

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0112-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.017

Effects of Two Herb Plants Roots on Soil Detachment in Alluvial Fan

JIANG Fangshi¹, HE Kaiwen¹, LI Hui¹, LIN Gengen²,

PENG Shaoyun², YUE Hui², LIN Jinshi¹, HUANG Yanhe¹

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002;

2. Soil and Water Conservation Experimental Station of Changting County, Changting, Fujian 366300)

Abstract: In order to investigate the effects of herbaceous roots on soil detachment in alluvial fan of *benggang*, *Paspalumwettsteinii* and *Pennisetum* sp. were chosen as the research objects, and an experiment was carried out using flow flumes with adjustable slope gradients to analyze the changing characteristics of soil detachment and their influencing factors. The results showed that the soil detachment rates of each soil layer were as follows: Bare land ($69.93 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$) > *Paspalumwettsteinii* ($57.42 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$) > *Pennisetum* sp. ($43.28 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$), and the soil detachment rates increased with the increase of soil depth as a power function. The most important factor to characterize soil detachment was root length density, and the soil detachment rates of *Paspalumwettsteinii* plot declined as a logarithmic function with all root indexes, while a power function decline was observed for *Pennisetum* sp. plot, indicating the difference effects of root system configurations on soil detachment. Soil detachment of two kinds of grasslands could be estimated using flow shear stress, soil shear strength, and root length density ($\text{NSE} \geq 0.90$). The results of this study could provide scientific evidences for the disposition of collapse management measures.

Keywords: *benggang*; alluvial fan; soil detachment; root; simulation

土壤分离过程是指在降雨溅击和径流冲刷作用下, 土壤颗粒脱离土壤母体的过程, 是土壤侵蚀过程的起始阶段^[1]。研究土壤分离过程的影响因素及作用机理, 建立土壤分离过程模型, 可以为土壤侵蚀的预测提供基础^[2]。根系是植被的重要组成部分, 通过对土壤的穿插、缠绕、固结以及根系分泌物与土壤的相互作用, 提高土壤的抗剪强度^[3], 从而增加土壤的抗分离能力。Zhang 等^[4]采用变坡水槽原状土冲刷

法研究表明, 土地利用显著影响土壤分离能力, 其中, 黄土农地土壤最易被分离, 其次是草地、灌木林地、荒地和林地土壤; 杨帆等^[5]研究发现, 狗尾草 (*Setaria viridis*) 根系对减少土壤侵蚀的效果好于青蒿 (*Artemisia carvifolia*); De Baets 等^[6]研究表明, 须根系植被的土壤分离速率随根系密度的增加呈指数函数形式下降; 王长燕等^[7]对黄土退耕还草区研究表明, 土壤分离能力可以用土壤容重、根系密度和水流剪切力

收稿日期: 2018-06-20

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAD15B0303); 国家自然科学基金项目(41571272)

第一作者: 蒋芳市(1979—), 男, 福建大田人, 讲师, 博士, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: jfsfafu@163.com

通信作者: 黄炎和(1962—), 男, 广东饶平人, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: yanhehuang@163.com

很好地模拟,而郁耀闯等^[8]研究却认为,可用土壤黏结力、根系密度和水流剪切力拟合黄土区玉米和谷子地的土壤分离能力。上述表明不同植被类型由于其植物生物学特性和空间结构的不同,对土壤固定作用存在差异,进而影响土壤的分离,根系对土壤分离的作用机制还需进一步研究。

崩岗是指在水力和重力共同作用下土体崩塌的侵蚀现象,属复合侵蚀类型^[9-10]。典型的崩岗主要由集水坡面、崩壁、崩积体、洪积扇等组成^[10-11],洪积扇是崩岗在发生时排出的大量泥沙经过水流作用能量减弱后沉积于丘陵山地外而形成,对下游造成严重危害^[12]。洪积扇土壤具有土质疏松,黏粒含量低,粗颗粒含量高,土壤肥力低下等特点^[12-13]。据调查,洪积扇土壤砾石含量占 28.43%、砂粒占 61.89%、粉粒占 8.84%、黏粒占 0.85%,土壤结构性差,极易受到侵蚀^[13]。选择耐瘠耐旱、生长速度快、根系发达的林草种作为先锋植物,并采取高密度种植,可以有效控制崩岗的发展,并促进崩岗区的生态恢复^[14]。据调查^[13-14],许多草本植物适合在崩岗洪积扇生长,如狗牙根(*Cynodon dactylon*)、宽叶雀稗(*Paspalum wetsteinii*)、巨菌草(*Pennisetum sp.*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)和香根草(*Vetiveria zizanioides*)等。目前关于崩岗区植被恢复研究主要集中在土壤养分、土壤的抗剪强度及蓄水等方面^[12-14],而根系对崩岗洪积扇抗分离的效应研究报道甚少。鉴于此,本文以崩岗洪积扇上种植的 2 种典型草本植物,深根系的巨菌草和浅根系的宽叶雀稗为研究对象,分析深根系植被和浅根系植被根系对崩岗洪积扇土壤分离的影响,比较 2 种草本植物根系改善洪积扇土壤抗分离的效果,探讨影响土壤分离的因素,并建立土壤分离的模型,以为崩岗防治中植被种类的筛选和推广提供依据,为崩岗治理成效的评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在福建省长汀县河田镇(25°39'N,116°28'E),该区地处亚热带季风气候区,降雨充沛,多年平均降水量 1 628.2 mm;气候温和,年均温 18.3℃,年无霜期 265 d^[13];植被以马尾松(*Pinus massoniana*)和芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等为主;土壤为粗晶花岗岩风化发育的红壤,风化壳深厚疏松,抗蚀能力弱,易在水力侵蚀和重力侵蚀的作用下发育形成崩岗。根据 2005 年的统计数据显示,长汀县崩岗数量为 3 584 座,占福建省崩岗总数(26 024 座)的 13.77%;河田镇共有崩岗 2 266 座,密度 7.64 座/km²,为福建省崩岗分布密度的 38 倍,是我国南方红

壤地带典型且严重的崩岗侵蚀区^[13]。

1.2 野外小区布置

在野外选择本底值一致的崩岗洪积扇。在试验区内分别种植巨菌草和宽叶雀稗,并选择不种植植物的空白区域作为对照。种植小区的种植密度为 3 600 穴/hm²,每穴施用有机肥 1 kg 作基肥。巨菌草采用短茎扦插法种植,将带有 2 个节的茎埋入穴中,后将茎的周围用土压实,栽后浇水至土壤湿透。宽叶雀稗采用种籽穴播法,每公顷播种量 7.5 kg 草籽,播种前,按草籽:有机肥:土为 1:50:160 的质量比例混合,后平分把混合草籽播到穴中,播完后再覆土 2~4 cm。2 种草的种植时间为 2015 年 4 月,种植完后第 3 个月(6 月)、2016 年的 4、6 月各追肥 1 次,追肥量为尿素 60 kg/hm²。栽培植被期间常规管理,定期清除杂草。

1.3 小区调查及样品采集

2016 年 8 月,对不同措施分别选择 3 块具有代表性的小区进行调查和采样,小区面积为 30 m²(6 m×5 m),植被基本情况见表 1。由表 1 可知,巨菌草的根系长度为 66 cm,大于宽叶雀稗的根系长度(45 cm),体现了不同草种根系的特性。由于宽叶雀稗的根系深度分布至 40 cm,为了比较的一致性,对所有小区的采样深度范围均为 0—40 cm。采集 0—5,5—10,15—20,25—30,35—40 cm 5 个土层的土样和根样。按照“S”形曲线,对每个小区选择长势较一致的植株进行采样。每个措施区采集 5 个层次、3 个流量、3 个坡度及 5 次重复所需土样,即 225 个土样,3 个措施区共 675 个土样进行室内水槽冲刷试验。为了消除表层结皮的影响,采样 0—5 cm 土层土样前,先用刮土刀去除结皮。采样时选取地表较为平整的区域,用环刀(内径为 9.8 cm,高为 5.0 cm)沿植株根部取原状土样。采样时,将环刀垂直压入土壤,向下压采样环之后,用剖面刀将环刀周围的土壤切开,减少环刀对土样的破坏;同时,采样过程中用剪刀对根系进行裁剪,使环刀内的根与下层的根分开,以减少采样过程中根系缠绕拉扯的影响。为了减少扰动误差,采完一层土样后,在同一株不同侧采集下一层的土样。土样采完后,用环盖将环刀盖住,并用橡皮筋扎紧土样,运回实验室进行冲刷试验。取混合样用于测定土壤的质地、化学等性质。样地土壤理化性质见表 2。

表 1 样地植被基本情况

植被种类	密度/ (穴·hm ⁻²)	平均株/ cm	平均 冠幅/cm	根长/ cm	根冠比	覆盖度/ %
巨菌草	3600	278±58	110±35	66±10	0.08±0.05	95
宽叶雀稗	3600	52±18	59±21	45±7	0.36±0.16	100

表 2 样地土壤理化性质

土层深度/cm	植被种类	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	抗剪 强度/kPa	颗粒分布/%			
						石砾	砂粒	粉粒	黏粒
						>2 mm	0.05~2 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm
0—20	裸地	4.30	3.26	1.41	8.51	28.43	61.88	8.84	0.85
	巨菌草	4.57	5.82	1.33	29.10	29.57	59.78	9.83	0.82
	宽叶雀稗	4.42	5.30	1.32	19.55	28.36	59.60	11.09	0.95
20—40	裸地	4.56	3.15	1.47	11.06	29.84	57.22	11.97	0.97
	巨菌草	4.55	4.42	1.42	13.91	32.48	58.95	7.94	0.63
	宽叶雀稗	4.78	4.10	1.43	11.12	25.08	66.05	8.24	0.63

1.4 土壤分离试验

试验采用水槽冲刷法进行原状土冲刷试验。试验水槽长 4 m, 宽 12 cm, 高 5 cm, 水槽供水处设置溢流槽以保证水流平缓。在下端安装 1 个铝制小圆槽(直径 10 cm, 高 5 cm), 用于安装原状土(图 1)。在水槽底部粘一层试验用土(为了减少根系的影响, 采用裸地的土样), 确保水槽粗度与野外的相似。在对水槽供水前, 需用蠕动泵率定流量。

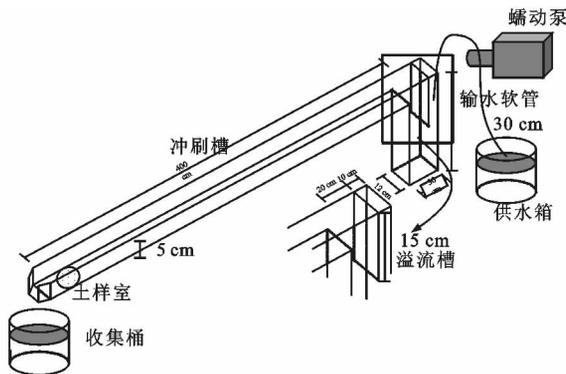


图 1 试验装置结构示意图

水槽冲刷试验坡度按崩岗洪积扇的平均坡度来设计, 分别为 5°, 10°, 15°。流量根据研究区暴雨发生频率及在洪积扇坡面上建立的径流小区上产生的单宽流量换算, 并结合前期的预试验得到, 设置 3 个流量(10, 20, 30 L/min)。用染色法测定水流表面最大流速, 乘以修正系数 0.8 得到平均流速, 径流水深采用流量、流速和槽宽计算^[1]。水流剪切力计算公式为^[1]:

$$\tau = \rho g h S \quad (1)$$

式中: τ 为水流剪切力(Pa); ρ 为水密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s²); S 为坡度(m/m); h 为水深(m)。不同坡度和流量下对应的水流剪切力依次为 2.70, 3.81, 4.91, 4.31, 6.41, 8.20, 5.18, 8.12, 10.51 Pa。

试验前将土样浸润 8 h 至饱和状态后, 再静置 0.5 h 去除重力水。试验开始时将土样放入水槽下端的放样室中, 用橡皮泥将土样与放样室的缝隙填满密封, 土样表面与水槽床面保持同一平面。冲刷前用盖子盖紧土样, 开启蠕动泵, 待水流稳定后打开盖子, 同时按下计时器, 水槽下端放泥沙收集桶, 收集冲刷下来的泥沙。Zhang 等^[4]研究表明, 可以将 2 cm 界定

为土样下切的最佳深度, 因此试验从打开盖子开始计时, 土样下切 2 cm 左右时停止冲刷。冲刷结束后, 将泥沙收集桶中的泥沙全部洗进铝盒中, 铝盒放置烘箱 105 °C 下烘至恒重。土壤分离速率定义为单位时间单位面积上流失的土壤干重, 其计算公式为:

$$D_r = W / (t \cdot A) \quad (2)$$

式中: D_r 为土壤分离速率(g/(s·m²)); W 为流失土壤干重(g); t 为冲刷时间(s); A 为土样环面积(m²)。

1.5 根系指标及土壤性质的测定

取出冲刷完后的环刀(内径为 9.8 cm, 高 5.0 cm)内的土壤, 将土样置于 0.05 mm 的网筛内轻轻进行冲洗, 直至洗出所有的根系, 将根系放入装有蒸馏水的蒸发皿中, 用镊子将根系从杂质中分离出来, 然后使用 WinRHIZO (Pro. 2004c) 根系分析系统对根系长度, 根表面积, 根长及分叉数等参数进行分析。测定后, 将根系放入信封内在 65 °C 条件下烘干至恒重, 获得根重。根系参数: 根重密度 = 环刀内烘干根重/环刀体积; 根表面积密度 = 环刀内根系表面积/环刀体积; 分叉数密度 = 环刀内根系分叉数/环刀体积; 根长密度 = 环刀内根系的长度/环刀体积。

土壤抗剪强度测定采用袖珍土壤剪力测量仪(三头抗剪仪)(Eijkelamp, Holland), 仪器主要由 1 个扭力计和 3 个不同测量范围值为 0~0.2, 0~1, 0~2.5 kg/cm² 的叶片各 1 个组成, 本次试验使用范围值为 0~1 kg/cm² 的叶片, 将三头抗剪仪的叶片轴插入土壤中, 以一定的速度和力度匀速转动测量仪的扭力计, 其力度在土壤张力断裂点测得, 表盘读数即为实际剪切强度值。各土层抗剪强度测定重复 5 次。土壤容重采用环刀(100 cm³)法测定, 每次测定 3 个重复。

1.6 模型有效系数计算

模型精度检验试验模型的拟合效果检验是运用模型有效系数(NSE)来实现的, 计算方法为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_i - Q_{oi})^2}{\sum(Q_i - Q_m)^2} \quad (3)$$

式中: NSE 为模型有效系数; Q_i 为第 i 个样本实测值; Q_{oi} 为第 i 个样本模拟值; Q_m 为实测平均值。

1.7 数理分析与统计

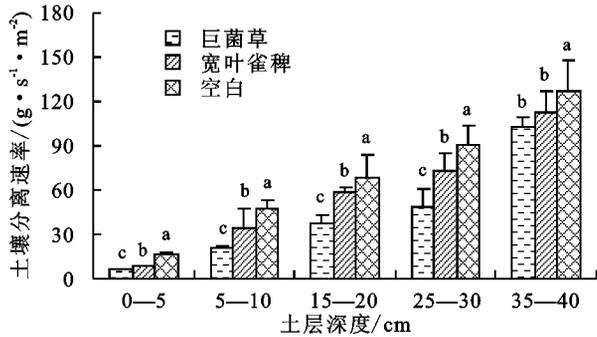
用 Excel 软件进行数据统计及图表绘制, 运用

SPSS 18.0 软件求拟合方程。

2 结果与分析

2.1 土壤分离特征

由图2可知,各措施小区的土壤分离速率均随土层深度的增加而增加,通过方程拟合发现,3个小区的土壤分离速率随着土层深度的增加呈幂函数形式增加(表3)。巨菌草和宽叶雀稗小区各土层的分离速率均显著低于裸地小区,3种不同措施区的土壤分离速率均值表现为:巨菌草($43.28 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$) < 宽叶雀稗($57.42 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$) < 裸地($69.93 \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$),与裸地小区相比,巨菌草和宽叶雀稗小区分离速率的减幅分别38.11%和17.89%。表明洪积扇植被恢复后,根系通过交叉缠绕,提高土壤的稳定性,同时根系产生根际分泌物,增加土壤颗粒胶结作用,二者共同作用以增加土壤的抗侵蚀能力,提高土壤抗分离能力。在0—5,5—10,15—20,25—30,35—40 cm层,裸地小区土壤分离速率分别是巨菌草分离速率的2.61,2.30,1.82,1.84,1.24倍,是宽叶雀稗的1.90,1.38,1.15,1.24,1.13倍,由此可以发现,随着土层深度的增加,含植被根系的土壤对减少分离速率的效果整体呈减小的趋势,原因是随着土层深度的增加,植被根系含量减小,固结土体的能力减弱,从而使土壤抗分离能力减小。这与张晓艳^[15]对黄土区草地土壤分离的研究结果一致。



注:同一土层中,具有相同字母则表示差异不显著($p>0.05$)。

图2 不同土层土壤分离速率

对比2个草种,在0—5,5—10,15—20,25—30,35—40 cm层,巨菌草的土壤分离速率均小于宽叶雀

稗,分别少了27%,40%,37%,33%,8%的土壤分离速率,且除了35—40 cm土层外,其他土层二者分离速率均达到显著水平。原因是巨菌草的根系比宽叶雀稗发达,在土壤中含有较多,因此稳固土体减小土壤分离速率的能力比宽叶雀稗高,而在35—40 cm层,由于该土层根系的含量已大大减少,因此根系对土壤抗分离能力的影响效果不显著。邓佳^[16]对红壤区不同草被研究也发现,不同土层土壤抗冲性能的增强效果取决于根系含量的多少,与本研究结果相似。

表3 不同措施区土壤分离速率(D_r)随土层深度(H)变化方程

措施区	主导因子方程	R^2	n
空白	$D_r = 17.58H^{1.23}$	0.99**	5
宽叶雀稗	$D_r = 9.75H^{1.54}$	0.98**	5
巨菌草	$D_r = 6.27H^{1.64}$	0.98**	5

注:*表示显著相关($p<0.05$);**表示极显著相关($p<0.01$)。下同。

2.2 影响土壤分离的因素

由表4可知,在崩岗洪积扇土壤中,土壤分离速率与根系各指标(根表面积密度、根重密度、分叉数密度、根长密度)呈极显著负相关,说明根系的存在能够显著增加土壤抗分离能力,因为根系越多,对土体的缠绕作用增强,同时根系与土壤接触的面积增大,导致根—土之间的摩擦力增大,土壤抗侵蚀能力增强。4种根系特征指标与土壤分离速率之间的相关系数变化范围为0.72~0.86,根长密度与土壤分离速率间的相关系数最大,达0.86,说明根长密度是影响土壤分离的最主要因素。图3进一步分析表明,宽叶雀稗小区土壤分离速率与各根系参数均呈对数函数下降(图3a~3d),而巨菌草区土壤分离速率均与各根系参数均呈幂函数下降(图3a~3d),说明宽叶雀稗土壤分离速率随根系指标下降而增加的速率比巨菌草的大,这与宽叶雀稗为浅根系植物,根系主要集中在土壤表层有关。郁耀闯等^[8]、De Baets等^[17]、Zhang等^[1]的研究结果则表明,土壤分离速率与根系密度呈指数负相关关系。说明由于不同植被根系构型特征的差异,导致不同植被类型下土壤分离效应的差别。

表4 土壤分离速率与根系特征及土壤性质相关性系数($n=10$)

项目	分离速率	根表面积密度	根重密度	分叉数密度	根长密度	抗剪强度	容重
分离速率	1**						
根表面积密度	-0.81**	1					
根重密度	-0.72*	0.96**	1				
分叉数密度	-0.79**	0.99**	0.94**	1**			
根长密度	-0.86**	0.98**	0.90**	0.97**	1**		
抗剪强度	-0.86**	0.86**	0.88**	0.81**	0.84**	1**	
容重	0.85**	-0.82**	-0.69*	-0.81**	-0.84**	-0.83**	1**

从表4还可看出,土壤分离速率与土壤抗剪强度呈极显著负相关,2种植物的土壤分离速率随着

土壤抗剪强度的增大呈线性减小(图3e),说明根系含量的增加,提高了土壤的黏聚力和内摩擦角,抗剪

强度增大,进而增强土壤的抗分离能力。这与王长燕等^[7]、De Baets 等^[17]、Zhang 等^[18]的研究结果一致。但土壤分离速率与土壤容重呈极显著正相关,且 2 种植物的土壤分离速率随着容重的增大呈线性函数增大(图 3f)。这与 Yu 等^[19]得出的结论相反。一般情况下,容重大的土壤结构较为紧实,不易被分离,

但本试验结果显示土壤容重越大土壤分离速率也随之增大,原因是土壤层次越深,其容重越大,但同时,根系含量是减小的,对土壤的固结能力减小,土壤的抗侵蚀能力显著下降,其抵抗水流分离的能力也随着降低,因此土壤分离速率与土壤容重会呈正相关关系。

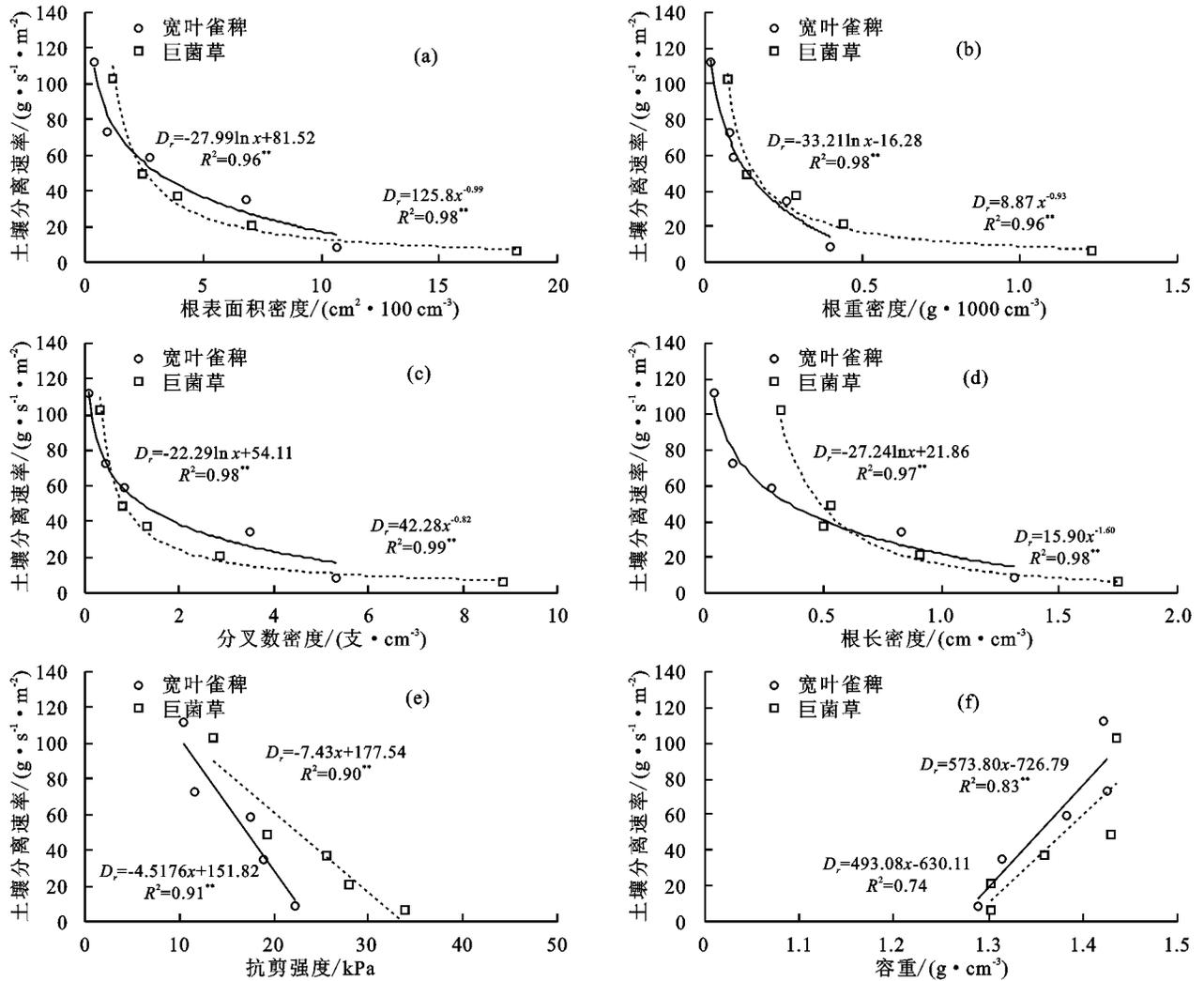


图 3 土壤分离速率与根系及土壤性质指标的关系

2.3 土壤分离的模拟

在根系指标中,根长密度与土壤分离速率相关系数最大,而土壤抗剪强度是根—土复合力学综合表现,同时考虑水流的作用,采用根长密度、土壤抗剪强度和血流剪切力构建土壤分离速率拟合方程:

$$D_r = a \cdot (\tau - b) \cdot \exp(c \cdot \text{RLD} + d \cdot S_c) \quad (4)$$

式中: D_r 为土壤分离速率 ($\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$); τ 为水流剪切力 (Pa); RLD 为根长密度 (cm/cm^3); S_c 为抗剪强度 (kPa); a 、 b 、 c 、 d 为常数。

2 种植物小区模拟方程的决定系数分别为 0.93 和 0.95, NSE 系数分别为 0.93 和 0.95, 而综合 2 种植物方程的决定系数 R^2 和 NSE 指数也分别达到了 0.91 和 0.90(表 5), 同时模拟值与实测值大部分靠近 1:1 线上(图 4), 说明方程的模拟效果良好。本

研究得到的土壤分离模型与 Yu 等^[19]、郁耀闯等^[8]及王长燕等^[7]的类似, 但指标上有差别。Yu 等^[19]和郁耀闯等^[8]模型指标为根重密度、土壤黏结力和水流剪切力, 而王长燕等^[7]的模型为根重密度、土壤容重和血流剪切力。从表 5 还可以看出, 引起土壤分离的剪切力分别为 0.66、0.33 Pa, 巨菌草的大于宽叶雀稗, 这说明巨菌草小区土壤开始发生分离需要的水流剪切力大于宽叶雀稗, 这与巨菌草根系密度及土壤抗剪强度均较大相对应。王长燕等^[7]对黄土丘陵区退耕草地的赖草 (*Leymus secalinus*) 和紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 土壤分离研究发现, 二者的临界水流剪切力分别为 7.20、4.18 Pa。本试验的临界剪切力远小于其数据。这可能因为本试验的土壤为洪积扇土壤, 土质比王长燕等^[7]的退耕还草的原状黄土疏松,

仅需较少的剪切力就能使土壤发生分离。

表5 土壤分离拟合方程参数 a 、 b 、 c 、 d 值

植被种类	a	b	c	d	R^2	NSE	样本数 (n)
宽叶雀稗	29.06	0.33	-4.28	-0.04	0.93	0.93	45
巨菌草	68.44	0.66	-1.13	-0.07	0.95	0.95	45
综合	35.33	0.54	-0.79	-0.05	0.91	0.90	90

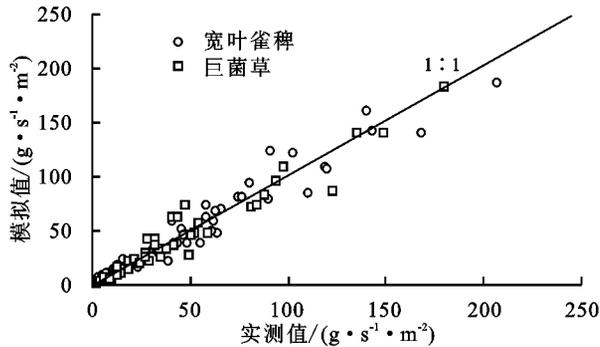


图4 土壤分离速率模拟值与实测值的比较

3 结论

(1)巨菌草、宽叶雀稗和裸地土壤分离速率均随着土层的加深呈幂函数增加;在各土层中,裸地土壤分离速率均最大,其次为宽叶雀稗,巨菌草的最小。

(2)根长密度是影响土壤分离的最主要根系指标,宽叶雀稗小区土壤分离速率与各根系参数均呈对数函数下降,而巨菌草区土壤分离速率与各根系参数均呈幂函数下降。2种植物的土壤分离速率与土壤抗剪强度呈极显著负相关,但随着土壤抗剪强度的增大呈线性减小。

(3)可利用土壤抗剪强度、根长密度和水流剪切力很好地模拟巨菌草和宽叶雀稗小区的土壤分离速率变化。

综上所述,崩岗洪积扇经种植巨菌草和宽叶雀稗后,土壤与根系形成的根土复合体抗剪强度提高,土壤抗侵蚀能力增强,从而有效地减少土壤分离。在不同土壤层次上,根系降低土壤分离的效应主要体现在表层,且巨菌草根系降低土壤分离的效应大于宽叶雀稗。因此,这2个草种有利于崩岗侵蚀区的水土保持,尤其是深根系的巨菌草。

参考文献:

[1] Zhang G H, Tang K M, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(9):1302-1309.

[2] 唐科明,张光辉,孙珍玲. 草地土壤分离能力季节变化特征及其影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2016(6):18-25.

[3] 赵丽兵,张宝贵,紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9):7-12.

[4] 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 American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2008, 51(3): 883-890.

[5] 杨帆,程金花,张洪江,等. 坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 129-137.

[6] De Baets S, Torri D, Poesen J, et al. Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(13): 1948-1963.

[7] 王长燕,郁耀闯. 黄土丘陵区退耕草地土壤分离能力季节变化研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(4):1047-1055.

[8] 郁耀闯,王长燕. 黄土丘陵区须根系作物地土壤分离季节变化研究[J]. *土壤*, 2016, 48(5):1015-1021.

[9] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China[J]. *Nature Hazards*, 2015, 79(1):455-478.

[10] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Sediment selective behaviors of colluvial deposit materials on steep slopes and under heavy rainfall conditions in southeastern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73:156-165.

[11] 蒋芳市,陈培济,黄炎和,等. 集中水流下土石混合物崩积体坡面侵蚀水动力特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6):8-14.

[12] 张勇,丁树文,魏玉杰,等. 崩岗洪积扇养分转移规律研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10):216-222.

[13] 何恺文,黄炎和,蒋芳市,等. 2种草本植物根系对长汀县崩岗洪积扇土壤水分状况的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4):25-34.

[14] 李慧,黄炎和,蒋芳市,等. 2种草本植物根系对崩岗洪积扇土壤抗剪强度的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3):96-101.

[15] 张晓艳. 黄土区草地植被恢复对土壤抗分离的影响及其作用机制研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2015.

[16] 邓佳. 南方红壤区常见草本根土复合体生物力学抗蚀机理研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2015.

[17] De Baets S, Poesen J. Empirical models for predicting the erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow erosion[J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4):425-432.

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

[19] Yu Y C, Zhang G H, Geng R, 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(3):139-148.