

水库消落带典型草本植物根系对土壤抗冲性能的影响

徐文秀^{1,2}, 鲍玉海¹, 韦杰^{2,3}, 杨玲^{1,4}, 贺秀斌¹, 李进林^{1,4}

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室,

成都 610041;2.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331;

3.三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室,重庆 401331;4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为明确水库消落带典型草本植物根系对土壤抵抗径流侵蚀性能的影响,以裸地为对照,通过原状土冲刷试验研究了狗牙根、扁穗牛鞭草和苍耳3种草地0—20 cm土层的土壤抗冲性能,并探讨了不同草本植物的根系特征及其对土壤抗冲性能的影响。结果表明:(1)3种草本植物根系均集中分布在0—10 cm土层,扁穗牛鞭草的根重密度、根长密度、根表面积密度和根体积密度均显著高于狗牙根和苍耳($P<0.05$)。(2)冲刷过程中各土样的径流含沙量均是先急剧降低后趋于稳定,放水冲刷0~3 min含沙量较高且快速降低,3~6 min缓慢降低,6~10 min趋于平稳。与对照相比,不同草地在10 min冲刷过程中均可有效减少径流含沙量,其中0—10 cm土层的径流含沙量大小表现为对照>狗牙根>苍耳>扁穗牛鞭草,10—20 cm土层则表现为对照>狗牙根>扁穗牛鞭草>苍耳。(3)冲刷过程中各土样的土壤抗冲指数均为先缓慢增大后迅速增大,抗冲指数在0~3 min内较小且缓慢增大,3~6 min时逐渐增大,6 min后迅速增大。与对照相比,不同草本植物根系均可有效增加土壤抗冲指数,其中各草地0—10 cm土层的抗冲指数与对照相比有显著差异,扁穗牛鞭草草地土壤抗冲指数最大,是对照的2.15倍,其次为苍耳、狗牙根草地,分别为对照的1.60、1.43倍;10—20 cm土层扁穗牛鞭草和苍耳草地的土壤抗冲指数与对照相比仍具有显著差异,而狗牙根草地则差异不显著。(4)草本植物根系对土壤抗冲性能的增强效应主要发生在0—10 cm土层,扁穗牛鞭草根系对土壤抗冲性能的增强效应最大,其次是苍耳,狗牙根最小。土壤抗冲性能的提高与根系分布、形态指标等密切相关, $D\leq 1.5$ mm径级根系根表面积密度和根体积密度是影响土壤抗冲指数的关键因子。

关键词: 抗冲性能; 草本植物根系; 抗冲指数; 水库消落带

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0065-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.010

Impacts of the Typical Herbaceous Plant Roots on Soil Scour Resistance in the Reservoir Riparian Zone

XU Wenxiu^{1,2}, BAO Yuhai¹, WEI Jie^{2,3}, YANG Ling^{1,4}, HE Xiubin¹, LI Jinlin^{1,4}

(1.Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 2.School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 3.Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331; 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: To investigate the impacts of typical herbaceous plants roots on soil resistance to runoff erosion in the reservoir riparian zone, simulation flume experiments of undisturbed-soil were carried out to study the soil erosion resistance of 0—20 cm soil layers of three grasslands (*Cynodon dactylon*, *Hemarthria compressa* and *Xanthium sibiricum*), and the bare land was taken as CK, and the root characteristics of different herbaceous plants and their effects on soil erosion resistance were also discussed. The results indicated that: (1) The roots of the three herbaceous plants mainly distributed in 0—10 cm soil layer, root weight density, root length density, root surface area density and root volume density of *H. compressa* were significantly higher than those of *C. dactylon* and *X. sibiricum* ($P<0.05$). (2) With the prolonging of scouring time, the runoff sediment concentration of all soil samples decreased sharply at first and then gradually stabilized. The sediment concentration was higher and decreased rapidly within 0~3 min after discharge, decreased slowly within 3~6 min and stabilized within 6~10 min. Compared with the CK, the runoff sediment content could be effectively reduced in the different grasslands in the 10-minute scouring process. The runoff sediment

收稿日期: 2019-01-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571278, 41771321); 四川省科技计划项目(2018SZ0132); 重庆市研究生科研创新项目(CYS18293)

第一作者: 徐文秀(1992—), 女, 山东昌邑人, 硕士研究生, 主要从事水土保持措施研究。E-mail: xuwenxiu0314@163.com

通信作者: 鲍玉海(1981—), 男, 山东成武人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: byh@imde.ac.cn

concentration of 0—10 cm soil layer followed the order of $CK > C. dactylon > X. sibiricum > H. compressa$, while that of 10—20 cm soil layer followed the order of $CK > C. dactylon > H. compressa > X. sibiricum$. (3) During the scouring process, the index of soil anti-scourability increased slowly at first and then increased rapidly, it was small and increased slowly within 0~3 min, gradually increased within 3~6 min and rapidly increased within 6~10 min. Compared with the CK, the root systems of different herbaceous plants could effectively increase the soil anti-scourindex, while there was a significantly difference between the three grasslands and the CK in 0—10 cm soil layer. The index of soil anti-scourability of *H. compressa* grassland was the largest, which was 2.15 times of the CK, followed by *X. sibiricum* and *C. dactylon* grasslands, which were 1.60 times and 1.43 times of the CK, respectively. Furthermore, there also was a significantly difference in the index of soil anti-scourability between the grasslands and the CK in 10—20 cm soil layer besides the *C. dactylon* grassland. (4) The enhancement effects of herbaceous roots on soil anti-scourability mainly occurred in 0—10 cm soil layer, and the enhancement effects of *H. compressa* roots on soil anti-scourability was the largest, followed by *X. sibiricum* and *C. dactylon*. The soil anti-scourability was closely related to root distribution and morphological indexes, especially root surface area density and root volume density of roots with diameter (D) ≤ 1.5 mm.

Keywords: soil anti-scourability; root system of herbaceous plants; index of soil anti-scourability; reservoir riparian zone

土壤抗冲性是反映土壤抗侵蚀能力的重要指标^[1],大量研究探讨了外界环境条件^[2-3]、土地利用方式^[4-5]、时间变化^[6]和植被作用^[7]等方面对土壤抗冲性的影响,并在表征方式和测定方法上取得了重要进展^[8-9]。植被根系提高土壤抗冲性的能力不可忽视,往往比地上部分有着更为重要的作用。已有研究^[10-13]表明,土壤抗冲性与土壤理化性质、根系分布等关系密切,而根系结构和根系形态特征是影响土壤抗冲性的重要因素,表征根系形态特征的参数常用来预测根系所发挥的减蚀效应及抵抗集中径流侵蚀的能力。不同径级级别的根系对土壤抗冲性的影响存在一定差异,其中 $D \leq 1.0$ mm 径级细根常发挥主要作用^[14-15]。目前相关研究^[14,16-18]主要集中在黄土高原区和紫色土丘陵区的地面坡面,而在季节性水陆交错的极端水分变化环境下的水库消落带研究相对较少。

国内外以三峡水库为代表的大中型水库运行过程中形成的水库消落带面临剧烈的土壤侵蚀和库岸再造过程^[19-22],植被的重建与恢复是控制其土壤流失和岸坡失稳的关键举措,而固土能力是筛选适生植物的重要依据^[20,23]。一年生和多年生草本植物通过地上部分和地下根系的防护作用可有效控制消落带土壤侵蚀,尤其是草本植物根系发挥了重要的减蚀效应,如扁穗牛鞭草和狗牙根草地的根系固土贡献率均在 70% 以上^[24-25]。近年来,国内研究从植被固土机制来开展消落带物种筛选的研究逐渐活跃,但多从根土复合体抗剪强度、抗蚀性能、土壤结构改善等方面展开研究,而草根本根系固土护坡尤其是提高土壤抗冲性能的研究相对匮乏。为此,本文以三峡水库消落带为例,选取了狗牙根(*Cynodon dactylon*)、扁穗牛鞭

草(*Hemarthria compressa*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*) 3 种典型草本植物为研究对象,对比分析不同草地的土壤抗冲性能,探讨草本植物根系对土壤抗冲性能的增强效应及影响机理,以期水库消落带植被恢复与固土护岸的物种筛选、群落构建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区处于三峡库区腹地的重庆忠县石宝镇(30°03′—30°35′N, 107°32′—108°14′E)。该区域消落带地处暖湿亚热带东南季风区,雨量充沛,年均降水量为 1 150 mm,且多集中于 6—8 月,相对湿度约为 80%,年均气温 19.2 °C,日照充足,日照时间 1 327.5 h。土壤母质为侏罗系沙溪庙砂页岩(J_2s),主要类型为紫色土、黄棕壤和水稻土,紫色土分布较为广泛。消落带淹水前土地利用方式主要有旱地、水田、林地等,主要种植作物有水稻(*Oryza glaberrima*)、玉米(*Zea mays*)、红薯(*Ipomoea batatas*)、黄豆(*Glycine max*)、油菜(*Brassica campestris*)、柑橘(*Citrus reticulata*)等。三峡工程蓄水后消落带现存植被主要有狗牙根(*Cynodon dactylon*)、扁穗牛鞭草(*Hemarthria compressa*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)等一年生和多年生草本植物^[24-25]。消落带出露成陆期,正值夏季,降雨多且集中,在暴雨冲刷和波浪冲刷作用下,土壤侵蚀强烈^[25]。

1.2 样地选择与采样

2018 年 8 月,在忠县石宝镇消落带 170 m 水位附近,选取人工恢复狗牙根和扁穗牛鞭草 2 种草地和自然恢复苍耳草地,以临近区域裸地为对照。狗牙根和扁穗

牛鞭草种植于 2007 年,已经历 11 年的周期性淹水过程,长势良好,盖度均在 95%以上,苍耳作为自然恢复的优势种群,盖度达 97%。各样地坡度均在 10°左右,土壤类型均为紫色土,各草本样地基本概况见表 1。在 3 种草本植物样地和对照样地,各选取 3 个代表采样点,清除

地上植株后分别用 10 cm×20 cm×10 cm 特制取样环刀(长×宽×高)竖直向下采集 0—10,10—20 cm 的抗冲土样,并在各采样点附近位置采集相应土层的普通环刀样和散土样,均密封妥善保存,并带回实验室用于土壤抗冲试验和理化性质分析。

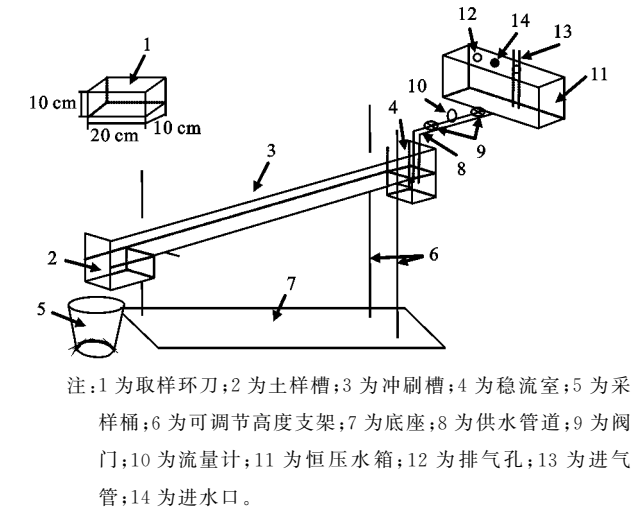
表 1 各草本植物样地基本概况

草本类型	坡度/°	盖度/%	生长高度/cm	地上生物量密度/(kg·m ⁻³)	土层深度/cm	土壤颗粒组成/%			容重/(g·cm ⁻³)
						黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	砂粒(>0.05~2 mm)	
狗牙根	8	95	76.25±3.82	1.78±3.02	0—10	6.57±0.48	43.33±3.49	50.10±3.96	1.19±0.01
					10—20	8.51±1.37	52.46±4.16	39.03±5.51	1.57±0.02
扁穗牛鞭草	9	98	145.00±7.64	17.03±64.78	0—10	6.01±0.28	46.89±1.93	47.10±1.65	1.27±0.06
					10—20	10.00±0.50	63.00±1.05	27.01±0.57	1.53±0.02
苍耳	8	97	188.33±7.26	1.99±5.64	0—10	6.34±0.29	58.58±0.91	35.08±1.20	1.10±.03
					10—20	6.89±0.37	54.41±6.69	38.70±7.04	1.55±0.07
对照	10	—	—	—	0—10	6.22±0.27	52.59±3.99	41.19±4.17	1.44±0.03
					10—20	7.01±0.18	46.16±0.96	46.83±1.13	1.47±0.08

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

1.3 试验方法与指标测定

土壤抗冲性试验研究方法采用改进的原状土冲刷水槽法^[26],根据原状土冲刷水槽法设置试验装置(图 1),试验冲刷槽为 200 cm×10 cm×10 cm(长×宽×高),稳流室为 10 cm×10 cm×20 cm(长×宽×高),土样槽为 10 cm×20 cm×10 cm(长×宽×高),供水装置为根据马氏瓶原理制作的恒压水箱。为模拟消落带缓坡采样地,试验冲刷坡度设定为 10°,放水流量按三峡库区暴雨发生时在标准径流小区上产生的单宽流量换算到试验冲刷水槽上的流量得到,为 2 L/min。



注:1 为取样环刀;2 为土样槽;3 为冲刷槽;4 为稳流室;5 为采样桶;6 为可调节高度支架;7 为底座;8 为供水管道;9 为阀门;10 为流量计;11 为恒压水箱;12 为排气孔;13 为进气管;14 为进水管。

图 1 原状土冲刷水槽设计示意

冲刷试验前,抗冲土样浸泡于水中 24 h,取出后静置 3~5 min,并放入土样槽内。用恒压水箱稳定供水,冲刷过程中每 1 min 取 1 次泥沙样,持续冲刷时长为 10 min,共取 10 次样。

土壤的抗冲能力用抗冲指数 AS 表示,即冲失 1 g 干土所需水量^[18],计算公式为:

$$AS_t = \frac{Q \cdot t}{WLDS_t}$$

式中:AS_t为 t 时刻的抗冲指数(L/g);Q 为冲刷流量(L/min);t 为冲刷历时,t=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 min;WLDS_t为 t 时刻冲失的干土重(g)。

土壤抗冲性能增强效应计算公式: $E_v = \Delta AS / AS_2 \times 100\% = AS_1 - AS_2 / AS_2 \times 100\%$ 。式中: E_v 为土壤抗冲指数强化百分率(土壤中根系的存在使土壤抗冲指数增强的百分率); ΔAS 为土壤抗冲指数增强值(土壤中根系的存在使土壤抗冲指数增加的数值);AS₁为含根土壤的抗冲指数;AS₂为对照裸地土壤的抗冲指数。

每次冲刷试验完成后,取出抗冲土样并放于水中浸泡,仔细清洗出所有根系,然后采用浙江托普云农 GXY-A 型根系分析系统,在 300 dpi 下进行灰度扫描,并分 4 个根系径级(0<D≤0.5,0.5<D≤1.0,1.0<D≤1.5,1.5<D≤2.0 mm)对根长度 RL,根表面积 RA 和根体积 RV 进行统计分析。扫描结束后将根烘干获得根干重 RW。分别用根干重、根长度、根表面积、根体积除以环刀体积获得根重密度(RWD)、根长密度(RLD)、根表面积密度(RSAD)和根体积密度(RVD),RLD_x、RSAD_x和 RVD_x(x=0.5,1.0,1.5,2.0)则分别表示(x-0.5)mm<D≤x mm 径级的根长密度、根表面积密度和根体积密度。用烘干法测定容重,用 MS 2000 激光粒度分析仪测定土壤颗粒组成。

2 结果与分析

2.1 不同草本植物根系分布特征

由表 2 可知,3 种草本植物在 0—10 cm 土层根

重密度和根长密度的大小表现为:扁穗牛鞭草>狗牙根>苍耳,根表面积密度和根体积密度则表现为:扁穗牛鞭草>苍耳>狗牙根,其中扁穗牛鞭草的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度均显著大于狗牙根和苍耳($P<0.05$)。而在 10—20 cm 土层,根长密度和根表面积密度表现为:狗牙根>扁穗牛鞭草>苍耳,根体积密度和根重密度表现为:苍耳>狗牙

根>扁穗牛鞭草,但各草本植物间根系特征参数的差异均不显著。就平均直径而言,苍耳在不同土层内均显著大于狗牙根和扁穗牛鞭草,狗牙根和扁穗牛鞭草的根系平均直径的差异不显著。各草本植物根系集中分布在 0—10 cm 土层,其根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度分别是 10—20 cm 土层的 6.80~12.56, 6.78~16.00, 6.75~29.25, 4.85~54.50 倍。

表 2 3 种草本植物根系特征参数

草本类型	土层深度/cm	RLD/ ($10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$)	RSAD/ ($10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$)	RVD/ ($10^{-2} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	RWD/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均直径/mm
狗牙根	0—10	143.12±19.41A	18.63±2.16A	0.33±0.02A	3.37±0.34A	0.50±0.03A
	10—20	21.05±3.17a	2.82±0.65a	0.04±0.01a	0.15±0.03a	0.51±0.03a
扁穗牛鞭草	0—10	229.55±33.06B	37.61±5.10B	0.72±0.10B	7.63±0.46B	0.59±0.03AB
	10—20	19.34±6.39a	2.63±0.79a	0.04±0.01a	0.14±0.10a	0.56±0.03a
苍耳	0—10	89.45±6.00A	24.02±1.79A	0.48±0.04A	2.33±0.07A	0.82±0.05B
	10—20	8.87±0.87a	2.36±0.53a	0.12±0.07a	0.48±0.34a	1.02±0.23b

注:同列不同大写字母表示 0—10 cm 土层不同草本类型之间差异显著($P<0.05$);同列不同小写字母表示 10—20 cm 土层不同草本类型之间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 不同草地径流含沙量动态变化特征

在模拟径流冲刷试验条件下,3 种草地和对照土样在 0~1 min 均具有较大的径流含沙量,此时段的径流含沙量占到试验时长总冲刷量的 45%以上,这主要是由于各土样表层较松散,在径流冲刷下土壤颗粒易被搬移,从而导致初始径流含沙量较大,其中对照的 0~1 min 初始径流含沙量分别是扁穗牛鞭草、苍耳和狗牙根草地的 2.23,1.91,1.59 倍。由此可见,与对照相比各草地表层根系发挥了较好的固土作用,显著降低了初始径流含沙量。总体来看,各土样冲刷过程中的径流含沙量的变化规律均是先急剧减小后逐渐趋于稳定(图 2),具体表现为冲刷试验的 0~3 min 径流含沙量锐减,最大降幅达 76%,3~6 min 径流含沙量降低渐趋缓慢,6~10 min 径流含沙量逐渐达到平稳。

同时,草地不同土层的径流含沙量均小于对照,且冲刷过程中 10—20 cm 土层的径流含沙量显著大于 0—10 cm 土层($P<0.05$)。由此可知,在相同冲刷条件下,无根系的对照土壤更易被冲刷,而草地具有更多根系分布的 0—10 cm 土层与 10—20 cm 土层相比表现出更好的抗冲性能。其中 0—10 cm 土层各草地土样的径流含沙量与对照具有显著差异($P<0.05$),大小表现为:对照(0.24 g/L)>狗牙根(0.17 g/L)>苍耳(0.15 g/L)>扁穗牛鞭草(0.12 g/L),其中扁穗牛鞭草与对照相比含沙量减少 50%,苍耳减少 38%,狗牙根减少 29%;而 10—20 cm 土层各草地土样的径流含沙量均小于对照但差异不显著($P<0.05$),大小表现为:对照(0.39 g/L)>狗牙根(0.37 g/L)>扁穗牛鞭草(0.35 g/L)>苍耳(0.27 g/L)。

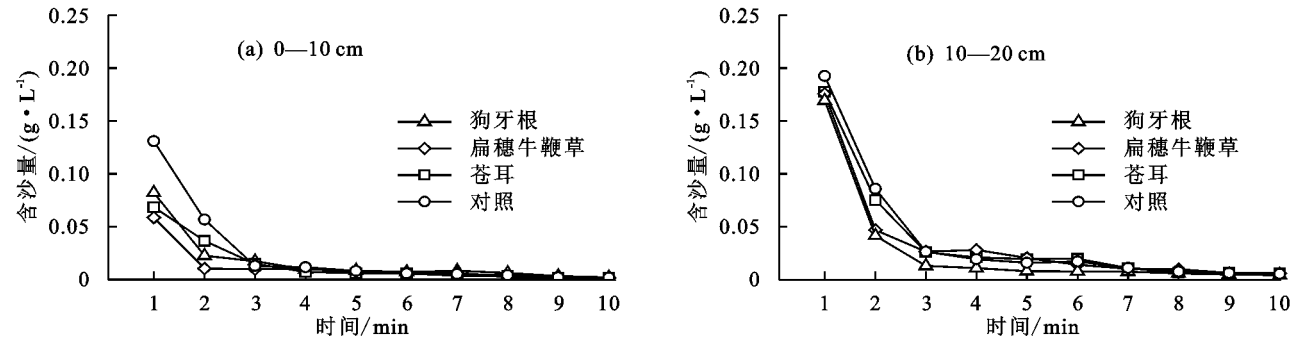


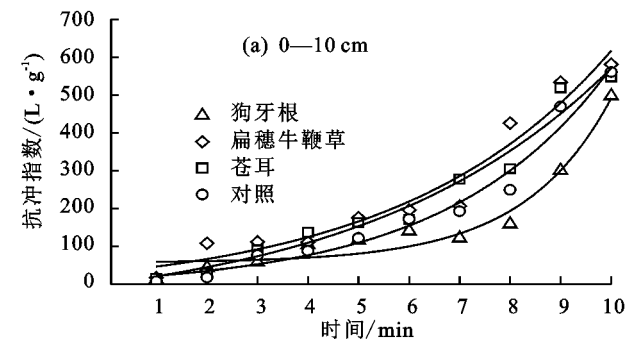
图 2 冲刷过程中径流含沙量随时间的变化

2.3 不同草地土壤抗冲指数的动态变化特征

3 种草地和对照的土壤抗冲指数均随冲刷时间延长而增大(图 3),呈较好的指数函数拟合关系(R^2 介于 0.93~0.97)(表 3)。土壤抗冲指数时间变化特征与径流含沙量的变化相吻合,冲刷试验 0~3 min 抗冲指数增长较为缓慢,3~6 min 内增长速率逐渐增大,6 min 后急剧

增加,最大增幅达到 5 倍。在相同时间段内,不同土样表现出大小各异的增长速率,0—10 cm 土层扁穗牛鞭草和苍耳草地的土壤抗冲指数增长速率较大,狗牙根和对照增长速率较小;10—20 cm 土层苍耳草地的土壤抗冲指数增长速率最大,其他草地和对照的抗冲指数增长速率较小且无明显差异。这主要由于狗牙根、扁穗牛鞭草

在 10—20 cm 土层根系分布减少,根长密度、根系体积密度等生长指标大幅降低,与对照相比根系生物量差异



不显著,而苍耳在这一土层仍具有较大的根系生物量,导致其抗冲指数明显高于其他土样。

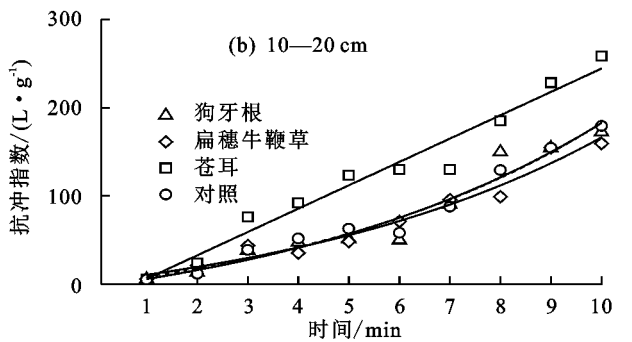


图 3 冲刷过程中土壤抗冲指数随时间的变化

表 3 3 种草地及对照的土壤抗冲指数动态变化拟合方程			
样地类型	土层深度/cm	拟合方程	R ²
狗牙根	0—10	$Y=1.35\exp(x/1.73)+56.69$	0.95
	10—20	$Y=54.42\exp(x/6.74)-57.28$	0.93
扁穗牛鞭草	0—10	$Y=58.01\exp(x/4.15)-27.47$	0.94
	10—20	$Y=47.18\exp(-x/6.69)-44.18$	0.96
苍耳	0—10	$Y=86.21\exp(x/4.93)-84.68$	0.96
	10—20	$Y=-1.65\exp(-x/6.22)+1.65$	0.95
对照	0—10	$Y=25.52\exp(x/3.19)-12.74$	0.97
	10—20	$Y=47.49\exp(x/6.34)-47.02$	0.97

2.4 不同草本植物根系对土壤抗冲性能的增强效应

草本植物根系可增强土壤抗冲性能,从表 4 可以看出,3 种草地不同土层的土壤抗冲指数均大于对照,其中 0—10 cm 土层各草地的土壤抗冲指数与对照相比差异显著,各土样抗冲指数表现为扁穗牛鞭草>苍耳>狗牙根>对照,扁穗牛鞭草草地土壤抗冲指数最大,是对照的 2.15 倍,其次为苍耳和狗牙根草地,分别为对照的 1.60,1.43 倍;10—20 cm 土层扁穗牛鞭草和苍耳草地的土壤抗冲指数与对照相比差异显著,而狗牙根草地则差异不显著。从不同草本植物根系对土壤抗冲指数的增强效应来看,0—10 cm 土层扁穗牛鞭草草地的土壤抗冲指数显著大于苍耳和狗牙根草地 ($P<0.05$),其抗冲指数强化百分率分别是苍耳和狗牙根草地的 1.92,2.68 倍;而 10—20 cm 土层苍耳草地的土壤抗冲指数显著大于扁穗牛鞭草和狗牙根草地,其强化百分率分别是扁穗牛鞭草和狗牙根草地的 3.37,8.39 倍。总体来看,草本植物根系对土壤抗冲性能的增强效应主要发生在 0—10 cm 土层,其抗冲指数增强值和强化百分率分别是 10—20 cm 土层的 2.34~15.05,1.44~9.32 倍,其中扁穗牛鞭草根系对土壤抗冲性能的增强效应最强,其次为苍耳,狗牙根最弱。上述草本植物根系对土壤抗冲性能增强效应的差异主要受 3 种草地不同土层的根系生长特征的影响。根系特征参数与抗冲指数的线性拟合关系均较好(图 4),其中抗冲指数与根体积分数的线性拟

合关系最好, R^2 达 0.94,其次为与根表面积密度的线性拟合关系, R^2 为 0.83,最后为与根重密度和根长密度的线形拟合关系, R^2 分别为 0.61 和 0.55。Person 相关分析显示,根重密度、根长密度、根表面积密度和根体积密度均与抗冲指数呈正相关,相关系数分别为 0.812,0.776,0.922,0.974,其中抗冲指数与根重密度、根表面积密度和根体积密度呈极显著正相关 ($P<0.01$),与根长密度呈显著正相关 ($P<0.05$)。

表 4 3 种草地及对照土壤的抗冲性能指标

草地类型	土层深度/cm	冲刷时间/min	AS/ (L·g ⁻¹)	△AS/ (L·g ⁻¹)	强化百分率/%
狗牙根	0—10	10	59.71±1.33B	17.96	43.02
	10—20	10	27.03±0.22ab	1.28	4.96
扁穗牛鞭草	0—10	10	89.60±10.23C	47.85	115.21
	10—20	10	28.94±0.71b	3.18	12.36
苍耳	0—10	10	66.82±2.76B	25.07	60.05
	10—20	10	36.48±0.68c	10.72	41.63
对照	0—10	10	41.75±0.61A	—	—
	10—20	10	25.75±0.79a	—	—

3 讨论

三峡水库消落带 3 种典型草本植物狗牙根、扁穗牛鞭草和苍耳的根系在 0—10,10—20 cm 土层均能提高土壤抗冲性能,同时受根系分布影响,根系对土壤抗冲性能的增强效应在 0—10 cm 土层表现最为显著。0—10 cm 土层不同草本植物根系对土壤抗冲性能的增强效应强弱表现为扁穗牛鞭草>苍耳>狗牙根,这种结果一方面与根系分形特征有关,扁穗牛鞭草的根长密度、根表面积密度、根体积密度和根重密度均显著大于狗牙根和苍耳 ($P<0.05$),表明其根系分布最为密集,与土壤接触面积最大,黏结、固持土壤能力最强;另一方面还与根系结构有关,扁穗牛鞭草、狗牙根属于须根系单子叶植物,主根不显明,根系主要由不定根构成,且分布较浅,大量须根能够在 0—10 cm 土层内交错缠绕形成密集根系网,具有更强的固持土壤能力;苍耳属于直根系双子叶植物,有明显

的主根,根系主要由主根和侧根构成,且分布较深,其主根及各级侧根在土壤表层形成的根系网密集程度往往弱于须根系草本植物。本研究中狗牙根虽属须

根系,但根表面积密度和根体积密度明显小于扁穗牛鞭草和苍耳,与土壤接触面积相对较小,故其对土壤抗冲性能的增强效应也相对较弱。

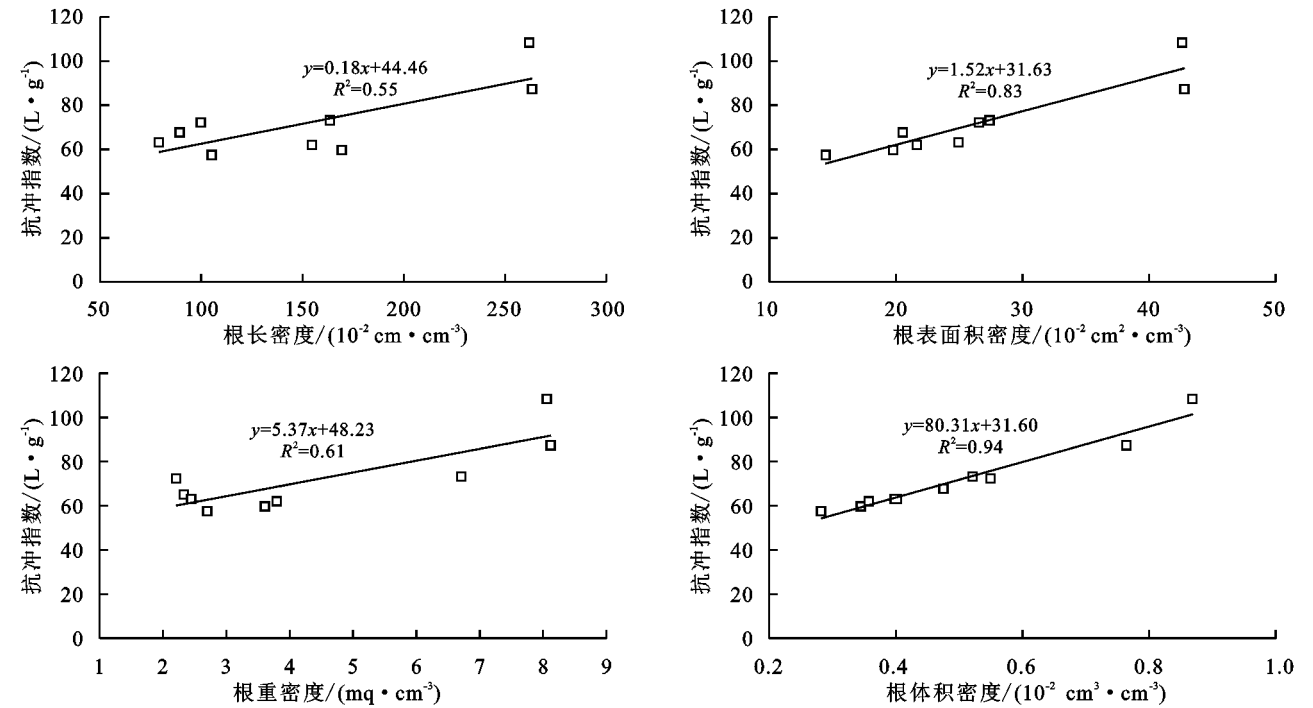


图 4 根系特征参数与抗冲指数的关系

根长密度和根表面积密度与土壤抗侵蚀性能显著相关,二者可作为表征土壤抗侵蚀性能的重要参数^[14]。而本研究还发现,草本植物根系的根重密度和体积密度也是重要的参数,相关系数均在 0.800 以上。已有研究^[14-15,27]认为,细根在提高土壤抗侵蚀性能方面具有非常重要的作用,尤其是 $D\leq 1.0$ mm 径级根系对提高土壤抗冲性能有重要影响,本研究中苍耳 $D\leq 1.0$ mm 径级根系的根表面积密度和根体积密度均较小,分别为 43%和 0.19%,而其 $D\geq 1.0$ mm 径级的根系占比较大(表 5),但其仍具有较好的土壤抗冲性能。对各径级根系参数与抗冲指数的 Person 相关分析结果表明, $D\leq 1.5$ mm 径级的所有根系参数与抗冲指数呈显著或极显著正相关,其中 $0.5\text{ mm}<D\leq 1.5$ mm 径级根系表现较为突出(表 6)。因此,3

种典型草本植物 $D\leq 1.5$ mm 根系在提高消落带土壤抗冲刷能力方面均能发挥重要作用。与以往研究相比,本研究除 $D\leq 1.0$ mm 径级根系发挥重要作用外, $1.0\text{ mm}<D\leq 1.5$ mm 径级根系也能够发挥较好作用,可能是由于这部分径级根系既与土壤颗粒接触面积大,黏结能力强,又具有良好的力学性能,因此固土作用也较好^[18]。植物根系可通过物理绕缠和改良土壤理化性质等方面影响土壤抗冲性能^[28-30],本文研究方案仅考虑了根系生长指标对土壤抗冲性能的物理固结作用,而根系分泌物也可显著改变根—土界面物理、化学和生物学性状,故进一步研究可考虑增加根系分泌物或死亡分解改善根际土壤作用对土壤冲刷过程的影响机制,并深入探讨根系构型、生物力学及主要化学组分等因素对土壤抗冲性能的作用机理。

表 5 0—10 cm 土层 3 种草本植物各径级根系参数

根系参数	草本类型	$0\leq D\leq 0.5\text{ mm}$	$0.5\leq D\leq 1.0\text{ mm}$	$1.0\leq D\leq 1.5\text{ mm}$	$1.5\leq D\leq 2.0\text{ mm}$
RLD/(10 ⁻² cm·cm ⁻³)	狗牙根	104.12±17.73a	30.02±2.15a	5.05±0.38a	3.93±0.74a
	扁穗牛鞭草	139.31±18.63a	71.99±12.92b	10.74±2.08b	7.51±0.31b
	苍耳	50.56±4.17b	21.77±1.89a	7.08±0.15ab	9.45±0.20c
RSAD/(10 ⁻² cm ² ·cm ⁻³)	狗牙根	7.75±1.28ab	6.41±0.47a	1.83±0.14a	2.64±0.67a
	扁穗牛鞭草	11.12±1.46a	15.80±2.85b	4.95±1.19b	5.75±0.43b
	苍耳	4.07±0.38b	4.76±0.42a	2.60±0.05ab	9.13±0.25c
RVD/(10 ⁻⁴ cm ³ ·cm ⁻³)	狗牙根	5.68±0.94a	11.30±0.83a	5.35±0.41a	10.48±0.51a
	扁穗牛鞭草	8.74±1.14b	28.68±5.17b	14.51±3.47b	19.87±1.90b
	苍耳	3.17±0.32a	8.62±0.76a	7.68±0.15ab	42.36±2.74c

表 6 0—10 cm 土层 3 种草地土壤抗冲指数与各径级根系参数相关分析结果

根系指标	RLD _{0.5}	RLD _{1.0}	RLD _{1.5}	RLD _{2.0}	RSAD _{0.5}	RSAD _{1.0}	RSAD _{1.5}	RSAD _{2.0}	RVD _{0.5}	RVD _{1.0}	RVD _{1.5}	RVD _{2.0}
相关系数	0.651	0.875**	0.759*	0.344	0.696*	0.884**	0.981**	0.118	0.735*	0.892**	0.982**	0.066

注: * 表示显著性水平为 0.05; ** 表示显著性水平为 0.01。

4 结 论

(1)消落带 3 种草本植物根系主要分布在 0—10 cm 土层,且此土层扁穗牛鞭草各项根系特征参数均显著大于狗牙根和苍耳,扁穗牛鞭草具有较好的根系生长表现。

(2)径流含沙量随冲刷时间延长先急剧降低后趋于稳定,草地的径流含沙量在 0—10,10—20 cm 土层均小于对照,与对照相比,0—10 cm 土层各草地土样的径流含沙量减少了 29%~50%;而 10—20 cm 土层各草地土样的径流含沙量仅减少了 5%~31%,可见草本植物根系主要分布的 0—10 cm 土层增强土壤抗冲刷能力优于 10—20 cm 土层。

(3)消落带土壤抗冲指数与时间的动态关系呈较好的指数函数拟合关系, R^2 介于 0.93~0.97;不同草地和对照的土壤抗冲指数均随冲刷时间延长先缓慢增大后迅速增大,0—10 cm 土层增长速度最快为扁穗牛鞭草和苍耳草地,10—20 cm 土层增长速度最快为苍耳草地;在整个冲刷过程中,扁穗牛鞭草草地土壤抗冲指数最大,其次是苍耳和狗牙根草地。

(4)草本植物根系对土壤抗冲性能的增强效应在 0—10 cm 土层较为显著,扁穗牛鞭草根系对土壤抗冲性能的增强效应明显强于苍耳和狗牙根,草本植物根系对土壤抗冲性能增强效应的差异主要受 3 种草地不同土层的根系生长特征的影响,土壤抗冲指数与根体积密度的线性拟合关系最好,其次为根表面积密度,最后为根重密度和根长密度。相关分析显示根重密度、根长密度、根表面积密度和根体积密度均与抗冲指数呈正相关,相关系数分别为 0.812,0.776,0.922,0.974。

参考文献:

[1] 刘红岩,周正朝,刘俊娥,等.黄土区草被生长过程中土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J].水土保持学报,2017,31(2):72-78.

[2] 伏耀龙,张兴昌.岷江干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性试验[J].农业机械学报,2012,43(7):50-55.

[3] 徐加盼,邓羽松,陈峰云,等.花岗岩崩岗不同层次土壤抗冲性及其影响因素[J].水土保持学报,2017,31(5):9-13.

[4] 张建辉,刘刚才,倪师军,等.紫色土不同土地利用条件下的土壤抗冲性研究[J].中国科学 E 辑:技术科学,2003(增刊 1):61-68.

[5] 王丹丹,张建军,丁杨,等.晋西黄土区退耕林地土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2014,28(3):14-18.

[6] 郭明明,王文龙,康宏亮,等.黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J].农业工程学报,

2018,34(22):138-146.

[7] 周正朝,上官周平.子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性[J].生态学报,2006,26(10):3271-3275.

[8] Zhou Z C, Shangguan Z P. Soil anti-scouribility enhanced by plant roots[J]. Journal of Integrative Plant Biology,2005,47(6):676-682.

[9] 郑粉莉,王占礼,杨勤科.我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J].自然杂志,2008,30(1):12-16.

[10] 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.

[11] 郭明明,王文龙,史倩华,等.黄土高原沟壑区退耕地土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J].农业工程学报,2016,32(10):129-136.

[12] Baets S D, 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.

[13] Gab T, Kacorzyk P. Root distribution and herbage production under different management regimes of mountain grassland [J]. Soil and Tillage Research, 2011,113(2):99-104.

[14] 徐少君,曾波.三峡库区 5 种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究[J].水土保持学报,2008,22(6):13-18.

[15] 杨玉梅,郑子成,李廷轩.不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(4):64-68.

[16] 卢立霞,曾波.三峡库区嘉陵江岸生优势须根系植物根系对土壤抗冲性的增强效应研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2006,31(3):157-161.

[17] 陈浩,余毅敏,唐旭栋,等.浦阳江下游江岸草本植物根系对土壤抗冲性的影响[J].水土保持研究,2017,24(2):60-63.

[18] 湛芸,何丙辉,练彩霞,等.三峡库区陡坡根—土复合体抗冲性能[J].生态学报,2016,36(16):5173-5181.

[19] 陈天富,林建平,冯炎基.新丰江水库消涨带岸坡侵蚀研究[J].热带地理,2002(2):166-170.

[20] Bao Y H, Gao P, He X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit[J]. Earth-Science Reviews,2015,150:14-24.

[21] Kirk R M, Komar P D, Stephenson J C A J. Shoreline erosion on Lake Hawea, New Zealand, caused by high lake levels and storm-wave runoff[J]. Journal of Coastal Research,2000,16(2):346-356.

120-127.

[19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[20] 黄东风,王果,李卫华,等.菜地土壤氮磷面源污染现状、机制及控制技术[J].应用生态学报,2009,20(4):991-1001.

[21] 常青,黄标,王洪杰,等.城乡交错区小型蔬菜生产系统氮磷钾元素平衡状况:以南京和无锡为例[J].土壤学报,2008,45(4):649-656.

[22] 曹志洪.施肥与水体环境质量:论施肥对环境的影响(2)[J].土壤,2003,35(5):353-363.

[23] 柏兆海,万其宇,李海港,等.县域农田土壤磷素积累及淋失风险分析:以北京市平谷区为例[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1853-1860.

[24] 郭智,刘红江,陈留根,等.有机肥施用对菜地磷素径流流失及磷素表观利用率的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):182-187.

[25] 鲁如坤.土壤磷素水平和水体环境保护[J].磷肥与复肥,2003,18(1):4-7.

[26] 王艳玲,何园球,吴洪生,等.长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析[J].土壤学报,2010,47(5):880-887.

[27] Guo Z, Liu H J, Zhou W, et al. Characteristics of phosphorus losses due to surface runoff in a peach orchard and the effects of inter-planting white clover (*Trifolium Repens* L.) on fruit yield and quality [J].Fresenius Environmental Bulletin,2016,25(12):5516-5527.

[28] Sharpley A N, Menzer R G. The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment[J].Advances in Agronomy,1987,41:297-324.

[29] 国家环境保护总局.GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].北京:国家环境保护总局,2002.

[30] 李强坤,胡亚伟,孙娟.农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J].中国生态农业学报,2010,18(1):210-214.

[31] 薛利红,杨林章,施卫明,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践:源头减量技术[J].农业环境科学学报,2013,32(5):881-888.

[32] 张刚,王德建,陈效民.稻田化肥减量施用的环境效应[J].中国生态农业学报,2008,16:327-330.

[33] 吴永红,胡正义,杨林章.农业面源污染控制工程的“减源—拦截—修复”(3R)理论与实践[J].农业工程学报,2011,27(5):1-6.

[34] 郭智,刘红江,张岳芳,等.不同施肥模式对菜地氮素径流损失与表观平衡的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):37-42.

[35] 朱文彬,汪玉,王慎强,等.太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1129-1135.

[36] 李松,李海丽,方晓波,等.生物质炭输入减少稻田痕量温室气体排放[J].农业工程学报,2014,30(21):234-240.

[37] Rees F, Simonnot M O, Morel J L. Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase[J].European Journal of Soil Science,2014,65(1):149-161.

[38] Lenmann J, Da Silva J P J, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J].Plant and Soil, 2003,249(2):343-357.

[39] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J].Geoderma,2010,158(3):436-442.

[40] 袁金华,徐仁扣.生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J].生态环境学报,2011,20(4):779-785.

[41] 王萌萌,周启星.生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J].环境化学,2013,32(5):768-780.

(上接第 71 页)

[22] Vilmundardóttir O K, Magnússon B, Gísladóttir G, et al. Shore line erosion and Aeolian deposition along a recently formed hydro-electric reservoir, Blöndulón, Iceland[J]. Geomorphology,2010,114(4):542-555.

[23] 樊大勇,熊高明,张爱英,等.三峡库区水位调度对消落带生态修复中物种筛选实践的影响[J].植物生态学报,2015,39(4):416-432.

[24] 钟荣华,贺秀斌,鲍玉海,等.三峡水库消落带几种草本植物根系的垂直分布特征[J].水土保持通报,2015,35(6):235-240.

[25] 钟荣华,贺秀斌,鲍玉海,等.狗牙根和牛鞭草的消浪减蚀作用[J].农业工程学报,2015,31(2):133-140.

[26] 蒋定生.黄土区不同利用类型土壤抗冲刷能力的研究[J].土壤通报,1979(4):22-25.

[27] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. Catena,2011,87(1):60-69.

[28] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, et al. The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment[J].Catena, 2018,166:192-199.

[29] Hudek C, Stanchi S, Amico M D, et al. Quantifying the contribution of the root system of alpine vegetation in the soil aggregate stability of moraine[J].International Soil and Water Conservation Research, 2017, 5(1):36-42.

[30] Eab K H, Likitlersuang S, Takahashi A. Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation[J]. Soils and Foundations,2015, 55(5):1270-1281.