

DOI: 10.5846/stxb201501270211

谌芸, 何丙辉, 练彩霞, 刘志鹏, 彭石磊. 三峡库区陡坡根-土复合体抗冲性能. 生态学报, 2016, 36(16): - .

Chen Y, He B H, Lian C X, Liu Z P, Peng S L. Study of root-soil system anti-scourability on steep slopes in the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): - .

三峡库区陡坡根-土复合体抗冲性能

谌 芸, 何丙辉*, 练彩霞, 刘志鹏, 彭石磊

西南大学资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要:以三峡库区已种植 4 年的紫花苜蓿、百喜草、狗牙根和香根草为对象,并以裸地为对照,采用改进的冲刷水槽、WinRHIZO (Pro.2004c) 根系分析系统和应变控制式直剪仪,分析测定 5 个处理根-土复合体抗冲性能以及根系、土壤参数,以期揭示不同草本植物根系对陡坡地紫色土表土抗冲性能的强化效应。研究结果表明:与对照(裸地)相比,4 种草本植物根系均能显著增强紫色土表土的抗冲性能,其中香根草根-土复合体的抗冲性能最强(为对照小区的 2.75—3.58 倍),而紫花苜蓿复合体的抗冲性能最弱(为对照小区 1.96—2.60 倍);草本植物根长密度(RLD)和根表面积密度(RSAD)是影响陡坡下紫色土表土抗冲性能的主要因子; $0.50\text{ mm}<d\leq 1.50\text{ mm}$ 径级的根系有利于土壤抗冲性能的增强,尤其是 $1.00\text{ mm}<d\leq 1.50\text{ mm}$ 径级的根系对根-土复合体的抗冲性能强化效应最大;4 种草本植物根系均有利于降低土壤容重、提高土壤有机质含量和增强土壤抗剪性能;土壤粘聚力 c 是影响根-土复合体抗冲性能的又一主要因子,径级 $1.00\text{ mm}<d\leq 2.00\text{ mm}$ 的根系则最有利于提高土壤粘聚力 c 。

关键词:紫色土;草本植物根系;抗冲指数;抗剪强度;粘聚力

Study of root-soil system anti-scourability on steep slopes in the Three Gorges Reservoir Area

CHEN Yun, HE Binghui*, LIAN Caixia, LIU Zhipeng, PENG Shilei

College of Resources and Environment/Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Grass roots can improve the soil's anti-scourability. The aim of this study was to determine the effects of the roots of different grasses on anti-scourability on steep slopes of purple soil in the Three Gorges Reservoir Area. *Medicago sativa*, *Paspalum natatu*, *Cynodon dactylon*, and *Vetiveria zizanioides* plants were planted 4 years prior to the experiment, and bare control plots were selected for soil sampling. The soil anti-scourability, root parameters (root dry weight, root length, root surface area, and root volume), soil shear strength (soil internal friction angle and cohesion), and soil chemical-physical characters (bulk density and organic matter) were measured using an improved flume scouring experiment, a root analysis system (WinRHIZO (Pro.2004c)), a direct shear test experiment, the ring method, and potassium dichromate external heating method, respectively. The results show that four species of grass roots could significantly enhance soil anti-scourability. *Vetiveria zizanioides* roots had the greatest effect on soil anti-scourability, as soils planted with this species exhibited anti-scourability values 2.75—3.58 times that of the control; while *Medicago sativa* roots had the weakest effect on soil anti-scourability, as soils planted with this species exhibited anti-scourability values 1.96—2.60 times that of the control. In the scouring experiments lasting 0—10 min, the soil anti-scourability of each plot increased over time, and these dynamic change processes can be fitted well ($R^2 = 0.9284 - 0.9691$) using two polynomial (the control and *Cynodon dactylon* plots) and logarithmic equations (the *Vetiveria zizanioides*, *Paspalum natatu*, and *Medicago sativa* plots). Root length density and root surface area density were the main factors affecting soil anti-scourability, and both were significantly correlated with anti-scourability ($P < 0.05$), especially the root surface area density. Root length density and root surface area density of *Vetiveria zizanioides* roots were the highest among the different species. A dividing line was set at 2.00 mm,

基金项目:国家自然科学基金(41271291, 41501288);中央高校基本科研业务费专项(SWU113013, XDJK2014C103, XDJK2015C170);国家科技支撑计划项目(2011BAD31B03);西南大学教育教学改革研究项目(2013JY052)

收稿日期:2015-01-27; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

and when $0.00 \text{ mm} < d \leq 2.00 \text{ mm}$, all *Vetiveria zizanioides* root parameters were higher than those of *Medicago sativa*. When $d > 2.00 \text{ mm}$, all *Medicago sativa* root parameters were higher than those of *Vetiveria zizanioides*. Roots whose diameters were $0.50 \text{ mm} < d \leq 1.50 \text{ mm}$ increased soil anti-scourability, especially roots ($1.00 \text{ mm} < d \leq 1.50 \text{ mm}$) whose parameters were significantly positively correlated with anti-scourability ($P < 0.01$). Four species of grass reduced the soil bulk density, increased the soil organic matter content, and enhanced the soil's anti-shear strength. The minimum soil bulk density and the maximum organic matter content were 1.42 g/cm^3 and 13.41 g/kg , respectively, in *Medicago sativa* plots. The soil bulk density of grass plots was significantly lower than that of the control plots. The organic matter contents of the *Medicago sativa*, *Cynodon dactylon*, and *Vetiveria zizanioides* plots were significantly higher than those of the control plots, but there was no significant difference between the organic matter contents of the *Paspalum natatu* and control plots. The maximum soil internal friction (ϕ) and cohesion (c) values were 28.82° and 82.60 kPa , respectively, in the *Vetiveria zizanioides* plots. Soil internal friction and cohesion of each grass plot were significantly higher than those of the control plots. Soil cohesion (c) was another main factor enhancing soil anti-scourability, and was significantly positively correlated with anti-scourability. Roots ($0.00 \text{ mm} < d \leq 0.50 \text{ mm}$ and $1.00 \text{ mm} < d \leq 2.00 \text{ mm}$) were found to enhance soil cohesion, especially roots $1.00 \text{ mm} < d \leq 2.00 \text{ mm}$.

Key Words: purple soil; grass roots; anti-scourability; soil shear strength; soil cohesion

土壤的抗冲性是指土壤抵抗径流冲刷破坏的能力,植物的根系则能提高土壤的抗冲性。早于 20 世纪 50 年代,朱显谟先生就指出根系的缠绕和固结作用决定了其对土壤抗冲性的增强效应^[1]。此后,众多学者结合多学科,在根系固土抗冲效应及机制方面进行了更为系统全面和细致深入的研究^[2-11]。已有的研究认为草类根系主要是通过提高土壤抗冲力及改善抗冲土体的物理性质而增强土壤抗冲性^[12],且不同径级的根系及不同根系指标对土壤抗冲性的影响差异较大,须根(直径 $\leq 1 \text{ mm}$)最有利于增强土壤抗冲性^[13],而根长密度是衡量土壤抗冲性的共性指标。目前我国根系与土壤抗冲性方面的研究成果虽多,但还存在一些不足:在研究地域上,主要集中在黄土高原,而三峡库区等水土流失严重地区的研究则相对较少;在研究植物种上,黄土高原涉及较广,囊括乔、灌、草^[14-15]并且关注了芒草^[16]和柳枝稷^[17]等生物质能源,而紫色土区较多的是水土保持先锋物种香根草;在冲刷坡度上,多数冲刷试验采用的是缓坡 15° ^[5,12,18-21],少有考虑陡坡大坡度^[22],而草本植物固土是软措施,抗冲能力有限,其在低缓边坡固土抗冲效果显著,但在陡坡地上的效果却未必;在根系指标上,多数研究选取的是所有根系平均的根重密度、根长密度、根表面积密度等,忽略了不同草本植物根系的径级分布范围和集中度不同,鲜有考虑到径级根系指标。

针对已有研究中存在的上述不足,并考虑到物种的广泛性、适生性和经济性,本实验选取了南方水土保持先锋物种香根草(*Vetiveria zizanioides*)和百喜草(*Paspalum natatu*),“牧草之王”紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和本地野生狗牙根(*Cynodon dactylon*)进行人工栽培,以裸地为对照,测定土壤容重、有机质、抗剪强度、抗冲指数和多个径级的根系指标,分析陡坡下(30°)上述 4 种草本植物根系对紫色土表土抗冲性能的强化效应及影响因素,尤其是各径级根系指标对土壤抗冲性的影响,以期对三峡库区陡坡地生态治理中草本植物合理选用及根—土复合体抗冲效应预估等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验小区位于重庆市北碚区歇马镇西南大学教学科研基地内。该基地位于 $106^\circ 48' 54'' \text{ E}$, $29^\circ 45' 08'' \text{ N}$, 属丘陵地貌,平均海拔 563 m 。该地区属亚热带湿润季风气候,年平均气温 18.3°C ;雨量充足,年平均降雨量 $1\,100 \text{ mm}$;日照较少,年平均日照 $1\,270 \text{ h}$ ^[23]。试验小区土壤为灰棕紫色土。

1.2 试验设计

紫花苜蓿、百喜草、狗牙根和香根草均为多年生草本植物,根系发达,抗逆性强。试验共设 5 个处理:对照,即裸地,无任何植被;4 个草本区,分别种植紫花苜蓿、百喜草、狗牙根和香根草,每个处理 3 次重复,共 15

个小区(长 6 m,宽 4 m),小区之间挖沟(宽 0.3 m,深 0.3 m)隔开,避免互相干扰。此外,设置补种区,一旦草本区植株被取样,则立即从补种区移植健康植株补上。所有草本植物均于 2011 年 3 月底采用育苗区健壮的实生苗移栽,“株距×行距”为“30 cm×35 cm”^[23]。栽培期间,各小区进行相同的常规管护,定期人工拔除杂草和灌溉。

1.3 样品采集

2014 年 7 月中旬,天气连续放晴时,进行土样采集。采样前 3 d 以上无拔草和灌溉。每个小区先按“五点法”确定采样点,然后分 0—10、10—20、20—30 cm 取各自的混合土样约 500 g 带回实验室,用于土壤有机质测定。

抗冲土样的采样工具为原状土冲刷水槽配套的方形环刀(长×宽×高:20 cm×10 cm×10 cm)。取样前,对照区按 S 曲线确定采样点;草本区,按 S 曲线选取健康成体植株,去除植株的地上部分后,以植株为中心确定采样点。先清除表层的枯落物、杂质和部分土层,将环刀刃口向下且水平缓慢地压入 10—20 cm 土层(因按 10 cm 分层采样难度较大,以此代表 0—30 cm 表土层),小心挖掘出,削平环刀两端,去除四周多余的土和根系。采集的土样,用保鲜膜密封,贴上标签,立即带回附近的实验室。每个小区 3 个重复,共计 45 个抗冲土样,则每一处理进行 9 次冲刷试验。直剪试验的取样方法与此类似,采用 ZJ 型应变控制式直剪仪配套的环刀(底面积 30 cm²,高 2 cm)分 0—10、10—20 和 20—30 cm 土层取样(本文仅对 10—20 cm 土层的直剪数据进行分析),每个小区 4 个重复,共计 180 个抗剪土样,则每一处理每一土层进行 12 次直剪试验。取样时,各草本区植被盖度约为 90%。

1.4 指标测定

土壤容重采用环刀法;有机质采用重铬酸钾—外加热法;抗剪强度采用直剪法;抗冲性采用改进的原状土冲刷水槽法。冲刷水槽长 1.80 m,宽 0.11 m。冲刷前,土样底部衬以滤纸置于水中浸泡约 12 h;饱和后,取出土样静置,除去重力水。冲刷坡度设定为 30°以模拟陡坡,出水流量为 2 L/min。待水流稳定后,将土样装入土样室,使土样上表面和槽底面齐平,然后放水冲刷。产流后开始取样,前 4 min 则每 1 min 收集一次径流泥沙样,此后每 3 min 收集一次,冲刷时长 10 min 共取 6 个样^[23]。冲刷完成后,取出环刀内的土样,先置于水中浸泡数小时以利于根、土分离;然后置于 0.05 mm 的网筛内用适当流量的自来水冲洗,直至洗出所有的根系;最后,采用 EPSON LA 在 400 dpi 下进行灰度扫描,WinRHIZO(Pro.2004c)根系分析系统分 10 个径级(0.0 mm < d ≤ 0.5 mm, 0.5 mm < d ≤ 1.0 mm, 1.0 mm < d ≤ 1.5 mm, 1.5 mm < d ≤ 2.0 mm, 2.0 mm < d ≤ 2.5 mm, 2.5 mm < d ≤ 3.0 mm, 3.0 mm < d ≤ 3.5 mm, 3.5 mm < d ≤ 4.0 mm, 4.0 mm < d ≤ 4.5 mm, d > 4.5 mm, d 为根系直径,单位 mm)对根系长度 RL(root length)、根表面积 RA(root surface area)和根体积 RV(root volume)等进行分析。扫描后的根系采用烘干法和 1/1 000 电子天平获得根干重 RW(root weight)。根重密度 RWD(root weight density)/根长密度 RLD(root length density)/根表面积密度 RSAD(root surface area density)/根体积密度 RVD(root volume density)是指单位土体对应的根干重/根长/根表面积/根体积; $RLD_x/RSAD_x/RVD_x$ ($x=0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 4.00, 4.50$)则表示($x-0.5$)mm < d ≤ x mm 径级的根长密度/根表面积密度/根体积密度, $RLD_{>4.5}/RSAD_{>4.5}/RVD_{>4.5}$ 表示 d > 4.5 mm 径级的根长密度/根表面积密度/根体积密度。

1.5 数据处理

土壤的抗冲能力用抗冲指数 AS(anti-scourability)表示,即冲失 1 g 干土所需水量,计算如下:

$$AS_t = \frac{Q \cdot t}{WLDS_t} \quad (1)$$

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, 7, 10 min; WLDS_t为 t 时刻冲失干土重, g。抗冲指数 AS 值越大,则表示土壤抗冲能力越强;反之,则越弱。

土壤内摩擦角 φ 和粘聚力 c 根据库伦定律,利用土样在竖直荷载为 100、200、300、400 kPa 下测得的抗剪强度 τ_f 线性回归确定。

采用 Microsoft Excel 2007 作图,SPSS 17.0 进行差异显著性检验 (Duncan 法, $P<0.05$)、Pearson 相关分析 (双侧, $P<0.05$, $P<0.01$)。

2 结果与分析

2.1 不同草本区复合体的抗冲性能

由图 1 可知,0—10 min 内各试验小区土壤的抗冲指数 AS 均随时间而增长;0—4 min, AS 增长较快,最大增幅达 18.88% 出现在香根草区 $t=2$ min 时;4—7 min, AS 增长渐趋缓慢;7—10 min, AS 增长更加缓慢,尤其是对照小区。各试验小区土壤抗冲指数 AS 随时间 t 的动态变化均可用方程 $AS = at^2 + bt + c$ 或 $AS = a\ln t + b$ (a 、 b 、 c 为常数, $t = 0—10$ min) 进行很好地拟合 ($R^2 = 0.9284—0.9691$),其中对照小区和狗牙根区用二次多项式方程拟合较好,而其它 3 个小区则用对数方程拟合较好。

试验小区的 AS 在所有测定时刻 ($t = 1, 2, 3, 4, 7, 10$ min) 均体现出显著性差异,草本区的 AS 均显著大于对照小区的。 $t = 1$ min 时香根草区与百喜草区的 AS 无显著性差异,排序为:香根草区/百喜草区>狗牙根区>紫花苜蓿区>对照小区; $t = 2, 3$ min 时紫花苜蓿区与狗牙根区的 AS 无显著性差异,排序为:香根草区>百喜草区>狗牙根区/紫花苜蓿区>对照小区; $t = 4, 7, 10$ min 时小区间的 AS 均存在显著性差异且排序均为:香根草区>百喜草区>狗牙根区>紫花苜蓿区>对照小区。所有观测时刻香根草区的 AS 值均最大,为对照小区的 2.75—3.58 倍,为百喜草区的 1.01—1.12 倍;而紫花苜蓿区的 AS 值在草本区中最小,亦为对照小区的 1.96—2.60 倍。

2.2 抗冲土样所含根系的根系指标

表 1 中,4 种草本植物抗冲土样的根重密度 RWD 存在显著性差异,表现为:紫花苜蓿>香根草>百喜草>狗牙根,紫花苜蓿的 RWD 最大 (164.16 mg/cm^3) 为狗牙根的 3.91 倍;根长密度 RLD 则表现为香根草、百喜草和狗牙根之间无显著性差异,却显著大于紫花苜蓿,前三种草本的 RLD 分别为紫花苜蓿的 3.77、3.62 和 2.56 倍;根表面积密度 RSAD 表现为香根草的显著大于紫花苜蓿的,百喜草 (狗牙根) 与香根草 (紫花苜蓿) 均无显著性差异,香根草的 RSAD 为紫花苜蓿的 1.47 倍;根体积密度 RVD 的显著性差异则表现为:紫花苜蓿>百喜草>香根草/狗牙根。总体上,抗冲土样中紫花苜蓿的 RWD 和 RVD 最大,而香根草的 RLD 和 RSAD 最大。

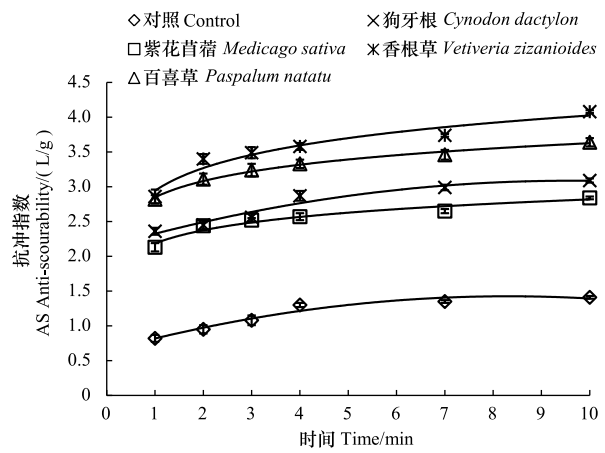


图 1 试验小区土壤抗冲指数动态变化
Fig.1 Dynamic changes of AS in experimental plots

表 1 草本区抗冲土样中根系的总体参数

Table 1 The overall parameters of roots in soil samples for scouring experiments

草类 Grass	根重密度 Root weight density/ (mg/cm^3)	根长密度 Root length density/ (10^{-2} cm/cm^3)	根表面积密度 Root surface area density/ ($10^{-2} \text{ cm}^2/\text{cm}^3$)	根体积密度 Root volume density/ ($10^{-2} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	164.16±19.46a	195.58±20.27b	93.65±9.02b	10.07±1.77a
百喜草 <i>Paspalum natatu</i>	75.92±9.45c	500.39±67.91a	118.13±23.81ab	7.76±0.28b
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	41.94±7.15d	708.73±96.85a	103.12±23.82ab	4.05±0.14c
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	128.35±12.70b	738.22±92.19a	137.22±10.07a	4.53±0.09c

表中数据为平均值±标准误差 ($n = 9$); 同列数据标有不同小写字母表示草类之间存在显著差异 (Duncan 法, $P<0.05$)

从表 2 径级根系指标的显著性分析可以看出:1) 草本间相同径级的根长密度、根表面积密度和根体积密度的显著性具有一致或非常相似的排序,如 $0.00 \text{ mm}<d\leq 0.50 \text{ mm}$ 时, $RLD_{0.50}$ 、 $RSAD_{0.50}$ 和 $RVD_{0.50}$ 显著性的排

表 2 草本区抗冲土样的各径级根系参数

Table 2 Root parameters of different diameter ranges in soil samples for scouring experiments		0.00<d ≤0.50/mm	0.50<d ≤1.00/mm	1.00<d ≤1.50/mm	1.50<d ≤2.00/mm	2.00<d ≤2.50/mm	2.50<d ≤3.00/mm	3.00<d ≤3.50/mm	3.50<d ≤4.00/mm	4.00<d ≤4.50/mm	d>4.50/mm
根系参数 Root parameters	草类 Grass										
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	65.90±11.16c	25.48±12.01b	27.24±10.94b	19.00±5.51b	16.49±3.32a	14.99±3.52a	8.61±2.01a	4.82±1.10a	2.54±1.49a	10.52±1.28a
根长密度/ (10 ⁻² cm/cm ³) Root length density	百喜草 <i>Paspalum natatu</i>	273.38±72.58b	119.96±44.72a	67.56±27.69ab	12.17±5.06b	4.15±1.81b	3.36±1.72b	2.48±0.25b	3.18±1.33b	1.60±0.83b	12.54±0.24a
	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	516.60±67.04a	101.26±37.93a	47.83±20.17ab	20.78±11.37b	9.49±5.13ab	5.91±2.01b	2.48±0.60b	0.96±0.37c	0.62±0.15b	2.81±1.80b
根表面积密度/ (10 ⁻² cm ² /cm ³) Root surface area density	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	453.49±71.92a	122.55±15.46a	86.93±7.21a	48.13±12.65a	15.12±1.54a	6.10±2.76b	2.76±0.37b	1.09±0.77c	1.18±0.79b	0.86±0.63b
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	3.32±0.61c	6.15±3.06b	10.60±4.96b	10.40±3.04b	11.64±2.41a	12.96±3.10a	8.77±2.12a	5.58±1.28a	3.37±1.98a	20.87±2.85a
	百喜草 <i>Paspalum natatu</i>	16.96±3.77b	28.44±10.83a	25.18±8.24ab	6.54±2.72b	2.88±1.25b	2.86±1.48b	2.52±0.22b	3.74±1.58b	2.12±1.11b	26.88±1.71a
	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	28.76±4.00a	22.47±8.68ab	18.28±6.59ab	11.25±5.12b	6.57±3.52ab	5.04±1.66b	2.52±0.61b	1.11±0.42c	0.81±0.21b	6.33±4.50b
根体积密度/ (10 ⁻² cm ³ /cm ³) Root volume density	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	27.10±4.96a	27.77±3.30a	33.79±2.88a	25.87±6.74a	10.36±1.03a	5.20±2.42b	2.80±1.40b	1.28±0.90c	1.57±1.04b	1.49±1.12b
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	0.03±0.01c	0.14±0.07b	0.32±0.15b	0.50±0.08b	0.56±0.17a	0.72±0.07a	1.03±0.32a	1.03±0.63a	0.64±0.34a	5.10±1.78a
	百喜草 <i>Paspalum natatu</i>	0.12±0.03b	0.56±0.12a	0.76±0.21ab	0.28±0.12b	0.16±0.07b	0.20±0.10b	0.20±0.02b	0.35±0.15b	0.22±0.12b	4.91±0.63a
	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	0.20±0.03a	0.41±0.16ab	0.56±0.17ab	0.49±0.16b	0.36±0.19ab	0.34±0.11b	0.20±0.05b	0.10±0.04c	0.08±0.02b	1.29±1.05b
	香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	0.20±0.04a	0.52±0.06a	1.06±0.09a	1.11±0.29a	0.57±0.06a	0.35±0.17b	0.23±0.11b	0.12±0.08c	0.17±0.11b	0.21±0.16b

表中数据为平均值±标准误差(n=9);同一指标同列数据标有不同小写字母表示草类之间存在显著差异(Duncan法,P<0.05)

序均为:狗牙根/香根草>百喜草>紫花苜蓿;2) $d=2.00$ mm 是一个分界线,当 $0.00\text{ mm}<d\leq 2.00\text{ mm}$ 时,香根草的各项根系指标均显著优于紫花苜蓿;当 $d>2.00\text{ mm}$ 时,则是紫花苜蓿的各项根系指标显著优于香根草;3) $1.50\text{ mm}<d\leq 2.00\text{ mm}$ 时,香根草的各项根系指标均显著优于其它 3 种草本,而这 3 种之间则无显著性差异;4) $2.50\text{ mm}<d\leq 4.50\text{ mm}$ 时,紫花苜蓿的各项根系指标均显著优于其它 3 种草本,而这 3 种之间亦无显著性差异。

Pearson 相关分析(表 4)表明:1) RLD 与 AS_4 、 AS_7 、 AS_{10} 显著正相关;2) RSAD 与所有时刻的 AS 显著正相关;3) $1.00\text{ mm}<d\leq 1.50\text{ mm}$ 时, $RLD_{1.50}$ 、 $RSAD_{1.50}$ 和 $RVD_{1.50}$ 与所有时刻的 AS 极显著正相关;4) $0.50\text{ mm}<d\leq 1.00\text{ mm}$ 、 $2.50\text{ mm}<d\leq 3.00\text{ mm}$ 和 $3.00\text{ mm}<d\leq 3.50\text{ mm}$ 时, $RLD_{1.00/3.00/3.50}$ 和 $RVD_{1.00/3.00/3.50}$ 与 AS_1 、 AS_4 、 AS_7 、 AS_{10} 显著正(负)相关;5) $0.50\text{ mm}<d\leq 1.00\text{ mm}$ 时, $RSAD_{1.00}$ 与 AS_1 、 AS_4 、 AS_7 、 AS_{10} 显著正相关。

2.3 不同草本区土壤的理化性质

表 3 中所有草本区的土壤容重均显著小于对照小区,而草本区之间则无显著性差异。数值上,土壤容重的排序为:对照小区>狗牙根区>百喜草区>香根草区>紫花苜蓿区,较之对照,紫花苜蓿区的土壤容重减幅高达 11.25%,而狗牙根区的减幅最小亦为 6.25%。除百喜草区的土壤有机质含量与对照小区无显著性差异外,其余草本区的土壤有机质含量均显著大于对照小区。其中紫花苜蓿区的土壤有机质含量最高为 13.68 g/kg,显著大于其它草本区;狗牙根区与香根草区之间则无显著性差异。

表 3 试验小区 10—20 cm 土层土壤理化性质和抗剪强度指标

Table 3 The soil bulk density, organic matter content, internal friction angle, and cohesion in 10—20 cm soil layer

小区 Plots	容重/(g/cm ³) Bulk density	有机质/(g/kg) Organic matter	内摩擦角 φ /(°) Internal friction angle	粘聚力 c /kPa Cohesion
对照 Control	1.60±0.01a	9.32±0.10c	9.71±0.47d	14.41±1.83c
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	1.42±0.02b	13.68±0.21a	17.29±0.73c	22.57±0.69b
百喜草 <i>Paspalum natatu</i>	1.49±0.03b	9.61±0.04c	17.86±0.68c	29.66±13.01b
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	1.50±0.04b	12.75±0.13b	23.43±0.56b	35.88±2.03b
香根草 <i>Vetiveria zizanioides</i>	1.44±0.06b	12.66±0.15b	28.82±1.74a	82.60±5.94a

表中数据为平均值±标准误差($n=3$); 同列数据标有不同小写字母表示试验小区之间存在显著差异(Duncan 法, $P<0.05$); 直剪试验时,同一小区每组试样之间的密度差值不大于 0.03 g/cm^3 , 含水率差值不大于 2%

2.4 不同草本区土壤的抗剪性能

表 3 中所有草本区 10—20 cm 土层的土壤内摩擦角 φ 均显著高于对照小区,排序为:香根草>狗牙根>百喜草/紫花苜蓿>对照,香根草区的 φ 为其它小区的 1.23—2.97 倍。香根草在该土层的土壤粘聚力 c 高达 82.60 kPa,亦显著大于其它小区;狗牙根区的 c 显著高于对照,但与百喜草区、紫花苜蓿区之间无显著性差异;百喜草区、紫花苜蓿区的 c 与对照小区的无显著性差异,但在数值上大于对照小区。Pearson 相关分析(表 4)表明各时刻的 AS 与 φ 无显著相关,但与 c 显著或极显著正相关,最大相关系数为 0.715。

表 4 AS 与各因子的相关分析

Table 4 Correlation analysis between AS and root/soil parameters

抗冲指数 AS Anti-scourability	c	$RLD_{1.0}$	$RLD_{1.5}$	$RLD_{3.0}$	$RLD_{3.5}$	RLD	$RSAD_{1.0}$	$RSAD_{1.5}$	$RSAD$	$RVD_{1.0}$	$RVD_{1.5}$	$RVD_{3.0}$	$RVD_{3.5}$
AS_1	0.599 *	0.651 *	0.712 **	-0.708 **	-0.662 *	0.557	0.659 *	0.726 **	0.679 *	0.642 *	0.717 **	-0.685 *	-0.698 *
AS_2	0.700 *	0.556	0.719 **	-0.521	-0.480	0.446	0.565	0.734 **	0.676 *	0.557	0.736 **	-0.498	-0.521
AS_3	0.683 *	0.560	0.705 *	-0.545	-0.510	0.448	0.569	0.717 **	0.654 *	0.561	0.718 **	-0.534	-0.532
AS_4	0.706 *	0.661 *	0.741 **	-0.656 *	-0.644 *	0.604 *	0.663 *	0.760 **	0.703 *	0.641 *	0.757 **	-0.625 *	-0.681 *
AS_7	0.715 **	0.658 *	0.741 **	-0.642 *	-0.640 *	0.597 *	0.659 *	0.758 **	0.695 *	0.638 *	0.756 **	-0.618 *	-0.665 *
AS_{10}	0.712 **	0.664 *	0.745 **	-0.648 *	-0.635 *	0.595 *	0.665 *	0.761 **	0.699 *	0.646 *	0.759 **	-0.626 *	-0.662 *

AS : 抗冲指数 anti-scourability; AS_t ($t=1, 2, 3, 4, 7, 10\text{ min}$): t 时刻的土壤抗冲指数; RLD : 根长密度 root length density; $RSAD$: 根表面积密度 root surface area density; RVD : 根体积密度 root volume density; $RLD_x/RSAD_x/RVD_x$ ($x=1.00, 1.50, 3.00, 3.50$) 分别表示 $0.50\text{ mm}<d\leq 1.00\text{ mm}$ 、 $1.00\text{ mm}<d\leq 1.50\text{ mm}$ 、 $2.50\text{ mm}<d\leq 3.00\text{ mm}$ 、 $3.00\text{ mm}<d\leq 3.50\text{ mm}$ 径级的根长密度/根表面积密度/根体积密度; * $P<0.05$, ** $P<0.01$

3 讨论

3.1 根系指标对复合体陡坡下抗冲性能的影响

根系的缠绕和网络固结作用,阻止了土颗粒分散,有利于提高土壤的抗冲性能^[24-25]。本试验中紫花苜蓿、百喜草、狗牙根和香根草的根系都显著增强了紫色土表土层的抗冲性,尤其是香根草,这与其它已有植物根系的研究结论一致^[23,26]。本研究充分考虑了根径的影响,将根系指标分为总体指标和径级指标。草本间相同径级的根系指标的显著性差异具有一致或非常相似的排序,而草本间总体指标的显著性差异却不具有此规律。

抗冲土样中紫花苜蓿的 RWD 显著大于其它草本,表明其根系对 10—20 cm 土层的土壤水分、养分和微量元素等的吸收能力较强,因此同体积的土样中其干物质量较大。此外,其 RVD 亦显著大于其它草本,占了抗冲土样体积的 0.50%,这表明其土样中可供冲刷的土壤应显著少于其它草本的。但其在各测定时刻的 AS 却小于其它草本,即其总体抗冲性能弱于其它草本。而 RWD 和 RVD 显著小于紫花苜蓿的香根草却在各时刻的抗冲性能均最好。可见,本实验中 RWD 和 RVD 不是影响根—土复合体抗冲性能的主要因子,Pearson 相关分析亦表明无显著相关。香根草的 RLD 和 RSAD 数值最大,相关分析中此二者与所有(部分)时刻的 AS 显著相关。紫花苜蓿的这两项根系指标最差,而抗冲性能居中的百喜草和狗牙根的此两项根系指标亦居中。RLD 反映了根系在土壤中的穿插和缠绕能力;RSAD 则能充分反映根—土之间的接触情况,其值越大表明根—土接触面积越大且耦合得越好。这从一方面解释了为何紫花苜蓿生长茂密、根系发达,其 AS 却较小。综上所述,RLD 和 RSAD 是影响陡坡下紫色土根—土复合体抗冲性能的主要因子,这与已有的研究结论一致^[27]。香根草与狗牙根相比,仅 RWD 具有显著优越性,且仅次于紫花苜蓿,可抗冲性能却显著优于狗牙根,可见 RWD 亦对复合体的抗冲性能产生有效影响,是次要因子。香根草的根系指标中影响土壤抗冲性的主要因子最优,次要因子居中,决定了其复合体具有好于其它 3 种草本的抗冲性。

已有的研究认为细根在提高土壤抗侵蚀方面具有非常重要的作用,因为其在土体中穿插范围广,与土壤颗粒结合较紧密,网络固持土颗粒的能力强,且受拉/剪时具有较好的弹性,而粗根对固土则没有明显贡献^[25]。较多的研究中将细根的直径确定为 $\leq 1\text{ mm}$ 即须根,认为这一径级的根系是固土的关键,如郑子成等^[28]在紫色土区玉米地的试验研究发现 $0.00\text{ mm} < d \leq 0.50\text{ mm}$ 径级的根长是影响土壤抗冲性增强效应的主要因素,而本研究中影响复合体抗冲性最重要的径级却是 $1.00\text{ mm} < d \leq 1.50\text{ mm}$,该径级的所有根系指标与所有测定时刻的抗冲指数均极显著正相关。其次才是须根的径级 $0.50\text{ mm} < d \leq 1.00\text{ mm}$,此径级的根系指标与 AS_1 、 AS_4 、 AS_7 、 AS_{10} 显著正相关。类似的研究结论在本试验区根土复合体抗剪性能的研究中亦出现,李建兴^[29]等的试验中对土壤粘聚力 c 贡献最大的亦不是须根,而是 $2.00\text{ mm} < d \leq 5.00\text{ mm}$ 径级的根系。径级 $2.50\text{ mm} < d \leq 3.00\text{ mm}$ 和 $3.00\text{ mm} < d \leq 3.50\text{ mm}$ 属粗根范围,本研究中此 2 个径级的 RLD 和 RVD 分别与 AS_1 、 AS_4 、 AS_7 、 AS_{10} 显著负相关。这从另一方面解释了为何紫花苜蓿根系发达却抗冲性能差,因其在 $0.50\text{ mm} < d \leq 1.50\text{ mm}$ 径级的各根系指标值最小甚至显著小于其它 3 种草本,而其在 $2.50\text{ mm} < d \leq 3.50\text{ mm}$ 径级的根系指标却显著大于其它 3 种草本。理论上,太细的根($d \leq 0.50\text{ mm}$)虽与土颗粒接触面大、粘结得好,但质量过轻且韧性不够,在较强的水流的冲击力作用下很容易随土冲走而发挥不出应有的固土作用;粗根虽具有较大的质量,但与土颗粒的粘结能力弱,很容易与土分离,亦起不到固土的作用,且一旦被水流冲走将使土样出现较大的孔隙反而加剧了土壤的冲刷。 $1.00\text{ mm} < d \leq 1.50\text{ mm}$ 径级的根系兼具了上述两种径级根系的优点,又在一定程度上克服了它们的缺点,所以对增强土壤抗冲性能的贡献最大。由于本研究根系径级划分较细,且仅有的研究也只关注了不同径级的根长/根长密度的影响,所以有关各径级根系对土壤抗冲性的影响还需要进一步和更多更深入的试验论证和机理上的揭示。

3.2 土壤指标对复合体陡坡下抗冲性能的影响

草本区土壤容重的有效降低与根系密切相关,活根穿插土壤、死根萎缩腐解等均能增加土壤孔隙度,进而

降低土壤容重。紫花苜蓿区的土壤容重值最小与其 RWD、RVD 最大有密切关系,相关分析中土壤容重与 RWD 极显著负相关(相关系数为-0.737)。虽然百喜草区与对照小区的土壤有机质含量无显著性差异,但所有草本区的有机质含量在数值上均大于对照小区,这表明总体上草本植物是有利于土壤有机质积累的,分析原因:一方面可能是植被覆盖地表,为枯落物和死根等腐殖物质的分解和转化提供了有利的温度和湿度,另一方面活根系的分泌物增加了土壤有机质含量,再一方面根系提高土壤微生物数量和活性,亦可提高土壤有机质含量。相关分析中,土壤有机质含量与 $2.00\text{ mm} < d \leq 2.50\text{ mm}$ 径级的所有根系指标均极显著正相关。虽然李强在黄土丘陵区的研究认为土壤容重是影响土壤抗冲性的因素^[20],但本研究中 AS 与土壤容重并无显著相关,具体原因有待于进一步的试验查明。

所有草本区 10—20 cm 土层的土壤内摩擦角 φ 均显著高于对照小区,可见草本植物根系能有效提高根—土复合体的内摩擦力。相关分析中 φ 与 RLD 极显著正相关(相关系数为 0.740),此外与 $0.00\text{ mm} < d \leq 0.50\text{ mm}$ 径级的所有根系指标亦极显著正相关,在李建兴等的研究中表土层的 φ 与 $RLD_{0.50}$ 、 $RSAD_{0.50}$ 极显著正相关(相关系数为 0.778)。这再次表明越细的根与土颗粒的接触越充分,进而越有利于增强土颗粒之间的摩擦力。植物根系增强土壤内摩擦力与根系中的根毛、叉根、根节等关系密切,这些的粗糙表面^[30]一方面增大了根、土的接触面积,另一方面增大了根表粗糙度,使根与土颗粒互相咬合在一起,从而使滑动摩擦力和咬合摩擦力增大。所有草本区 10—20 cm 土层的粘聚力 c 均显著大于对照小区,表明植物根系有利于提高土壤的粘聚力。相关分析中 c 与 RLD、RSAD、 $RLD_{0.50/2.00}$ 、 $RSAD_{0.50/2.00}$ 、 $RVD_{0.50/2.00}$ 显著或极显著正相关,而香根草的这些根系指标均是最优或次优,因此其试验小区土壤粘聚力显著大于其它小区的。分析原因众多根系穿扎在土壤的孔隙中,如同在土壤中增设了许多微细钢筋,形成防护网,一方面根系将周围的细土粒网络、凝聚在一起,使土壤凝聚力增大,另一方面根系又被周围细土粒层层包裹,而被锚固在土壤中,形成一个整体,增强了复合体抵抗径流冲刷的能力。相关分析中, c 与所有时刻的 AS 显著或极显著正相关,是影响复合体抗冲性能的主要因子。李强^[20]在黄土丘陵区的研究亦认为土壤粘聚力 c 是影响土壤抗冲性的因素,陈安强^[19]对元谋干热河谷坡面表土的研究亦表明土壤抗冲指数随着粘聚力 c 的增大呈对数函数增长, c 越大,土壤颗粒内部及颗粒间的凝聚力和摩擦力就越大,土壤的抗冲性能就越好。

4 结论

1)陡坡(30°)下,紫花苜蓿、百喜草、狗牙根和香根草等 4 种草本植物根系均能显著增强紫色土表土的抗冲性能,且香根草根—土复合体的抗冲性能最强,而紫花苜蓿复合体的抗冲性能则最弱;所有试验小区的土壤抗冲指数 AS 动态变化均能用对数或二次多项式方程进行良好的拟合, $R^2=0.9284—0.9691$ 。

2)抗冲土样中紫花苜蓿的根重密度 RWD 和根体积密度 RVD 最大,香根草的根长密度 RLD 和根表面积 RSAD 最大;RLD 和 RSAD 是影响陡坡下紫色土根—土复合体抗冲性能的主要因子,RWD 则是次要因子; $0.50\text{ mm} < d \leq 1.50\text{ mm}$ 径级的根系有利于土壤抗冲性能的增强,尤其是 $1.00\text{ mm} < d \leq 1.50\text{ mm}$ 径级,而 $2.50\text{ mm} < d \leq 3.50\text{ mm}$ 径级的根系则不利于提高土壤抗冲性。

3)这 4 种草本植物均有利于降低土壤容重,提高土壤有机质含量和增强土壤抗剪性能;香根草复合体的抗剪强度指标(土壤内摩擦角 φ 和粘聚力 c)显著大于其它小区; c 是影响陡坡下紫色土根—土复合体抗冲性能的主要因子,而 $0.00\text{ mm} < d \leq 0.50\text{ mm}$ 和 $1.00\text{ mm} < d \leq 2.00\text{ mm}$ 是影响 c 的主要根系径级,尤其是径级 $1.00\text{ mm} < d \leq 2.00\text{ mm}$ 最有利于 c 的提高。

参考文献(References):

- [1] 朱显谟. 黄土地区植被因素对于水土流失的影响. 土壤学报, 1960, 8(2): 110-120.
- [2] Gysels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(4): 371-384.
- [3] Zhou Z C, Shanguan Z P. Soil Anti-Scourability Enhanced by Plant Roots. Journal of Integrative Plant Biology, 2005, 47(6): 676-682.

- [4] De Baets S, Poesen J, Gysels G, Knapen A. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 2006, 76 (1/2): 54-67.
- [5] 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. *生态学报*, 2006, 26(10): 3270-3275.
- [6] De Baets S, Poesen J, Knapen A, Galindo P. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(9): 1323-1345.
- [7] De Baets S, Poesen J, Knapen A, Barberá G G, Navarro J A. Root characteristics of representative mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. *Plant and Soil*, 2007, 294(1/2): 169-183.
- [8] Yu Y C, Zhang G H, Geng R, Sun L. Temporal variation in soil detachment capacity by overland flow under four typical crops in the Loess Plateau of China. *Biosystems Engineering*, 2014, 122: 139-148.
- [9] 蒲玉琳, 谢德体, 倪九派, 魏朝富, 林超文. 紫色土区植物篱模式对坡耕地土壤抗剪强度与抗冲性的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(5): 934-945.
- [10] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, Zhang X C. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China. *Catena*, 2014, 116: 51-59.
- [11] De Baets S, Quine T A, Poesen J. Root strategies for rill and gully erosion control // Morte A, Varma A, eds. *Root Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer, 2014: 297-323.
- [12] 史东梅, 陈晏. 紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素. *中国农业科学*, 2008, 41(5): 1400-1409.
- [13] Zhang C B, Chen L H, Jiang J. Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. *Geomorphology*, 2014, 206: 196-202.
- [14] 田风霞, 刘刚, 郑世清, 马春艳, 张琼. 草本植物对土质路面径流水动力学特征及水沙过程的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 25-29.
- [15] 张超波. 林木根系固土护坡力学基础研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [16] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 50-55.
- [17] Zhang G H, Tang K, Ren Z, Zhang X C. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2013, 56(3): 927-934.
- [18] 陈晏, 史东梅, 文卓立, 张兵. 紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗冲性特征研究. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 24-27.
- [19] 陈安强, 张丹, 熊东红, 刘刚才. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 108-113.
- [20] 李强, 刘国彬, 许明祥, 张正, 孙会. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质. *农业工程学报*, 2013, 29(10): 153-159.
- [21] 李强, 刘国彬, 许明祥, 孙会, 张正, 高丽倩. 黄土丘陵区冻融对土壤抗冲性及相关物理性质的影响. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 105-112.
- [22] Xu W, Wang X, Zhang Y, Liu Y. A comparison among root soil-conservation effects for nine herbs at the cold region highway in north-eastern China. *Eurasian Soil Science*, 2014, 47(12): 1274-1282.
- [23] 湛芸. 植物篱对紫色土水土特性的效应及作用机理[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [24] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 刘爱平, 杨小洁. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 62-65.
- [25] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 蔡锡安. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 895-904.
- [26] 宋坤, 潘晓星, 穆立嵩. 6 种草本植物根系土壤抗冲性. *国土与自然资源研究*, 2013, (3): 82-83.
- [27] Shit P K, Maiti R. Effect of plant roots on soil anti-scourability of topsoil during concentrated flow. *International Journal of Engineering*, 2012, 1 (4): 1-7.
- [28] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 金伟, 林超文. 玉米季土壤抗冲性变化特征及其影响因素分析. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 180-186.
- [29] 李建兴, 何丙辉, 湛芸, 黄茹, 陶俊, 田太强. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响. *农业工程学报*, 2013, 29 (10): 144-152.
- [30] 张兴玲, 胡夏嵩, 李国荣, 朱海丽, 毛小青, 袁晓伟. 青藏高原东北部黄土区灌木幼林根系护坡的时间效应. *农业工程学报*, 2012, 28 (4): 136-141.