

DOI: 10.5846/stxb201901100085

唐菡, 谌芸, 刘泉宏, 何丙辉, 李勇, 强娇娇, 李铁. 喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根-土复合体力学特性研究. 生态学报, 2019, 39(16): - .

Tang H, Chen Y, Liu X H, He B H, Li Y, Qiang J J, Li T. Study on the mechanic features of root and root-soil matrix of *Dolichos lablab* L. hedgerows on the slopes of the karst area. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - .

喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根-土复合体力学特性研究

唐 菡, 谌 芸*, 刘泉宏, 何丙辉, 李 勇, 强娇娇, 李 铁

西南大学资源环境学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要:为探索地埂篱在喀斯特坡地水土保持中的价值,在重庆市酉阳县喀斯特顺层坡种植拉巴豆地埂篱,通过对根系灰度扫描、化学成分(木质素、纤维素、半纤维素)测定,单根抗拉试验和根-土复合体抗剪/冲试验,分析拉巴豆地埂篱根及根-土复合体的力学特性及影响因素。结果表明:(1)拉巴豆根系全根指标根长、根表面积、根体积、根重均表现为中坡>下坡>上坡,优势径级为 $0.0 < d \leq 1.0$ mm 径级。全根根系纤维素的平均含量较木质素、半纤维素高,且与根系直径呈显著负相关。(2)根系平均极限抗拉力 6.77 N、平均抗拉强度 29.57 MPa。极限抗拉力与木质素含量呈对数函数正相关、与木纤比呈线性正相关,抗拉强度与纤维素含量、木质素/纤维素(木纤比)分别为对数函数正相关和负相关。(3)上坡位抗剪土样的根体积密度、根重密度和木纤比显著大于中、下坡;而抗冲土样的根体积密度、根重密度、纤维素和半纤维素含量则中坡较优,但不显著。(4)根系能有效提高土体抗剪性能,根-土复合体的内摩擦角与粘聚力均较对照裸地高,但仅上坡粘聚力存在显著性差异(较对照增大 45.67%)。内摩擦角和抗冲指数均中坡、下坡较优,粘聚力最优值位于上坡位。根-土复合体的力学特性主要受根体积、根重、根表面积密度和纤维素的影响。综上,拉巴豆根及根-土复合体的力学特性主要贡献径级为 $0.0 < d \leq 1.0$ mm 径级,中、下坡细根量大且根-土复合体抗冲性能表现较优,上坡根-土复合体抗剪切能力最强,但抗冲性能较弱。在推广拉巴豆地埂篱时,尽量种植于地势较低缓的中、下坡,更能突显水土保持效益。

关键词:拉巴豆;地埂篱;根长;纤维素;抗剪强度;抗冲指数

Study on the mechanic features of root and root-soil matrix of *Dolichos lablab* L. hedgerows on the slopes of the karst area

TANG Han, CHEN Yun*, LIU Xiaohong, HE Binghui, LI Yong, QIANG Jiaojiao, LI Tie

Key Laboratory of Karst Environment, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: To explore the effect of *Dolichos lablab* L. hedgerows on soil and water conservation, we planted *Dolichos lablab* L. at up, middle, and down slopes at bedding slopes of the karst valley in Youyang Chongqing. The roots and root-soil matrix were sampled. The mechanical properties of roots, soil anti-scourability, and soil shear strength of root-soil matrix were tested. To find the factors affecting mechanical properties, we scanned root grayscale and tested root chemical compositions (lignin, cellulose, and hemicellulose), and also performed correlation analysis. The results showed that: (1) The whole root parameters (root length, root surface area, root volume, and root weight) had the highest value in the middle slope portion, followed by down slope portion; the corresponding value of the up slope portion was minimum. Root dominant diameter was in the range of $0.0 < d \leq 1.0$ mm. The average content of cellulose in plant root was higher than that of

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502303);中央高校基本业务费专项资金资助(XDJK2018B044);岩溶环境重庆市重点实验室开放课题资助(Cqk201803)

收稿日期:2019-01-10; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sy22478@126.com

lignin and hemicellulose. The root cellulose content was significantly negatively correlated with root diameter. (2) The root average ultimate tensile force of *Dolichos lablab* L. was 6.77 N and the average tensile strength was 29.57 MPa. Cellulose and lignin had statistically significant influences on the root mechanical properties. Their regression relations are as follows: the ultimate tensile force increased logarithmically with lignin content and increased linearly with wood fiber ratio; tensile strength increased logarithmically with cellulose content, decreased logarithmically with lignin/cellulose (wood to fiber ratio). (3) The root volume density, root weight density, and wood fiber ratio of the up slope shear strength samples were significantly greater than those of the middle and down slopes. However, for the anti-scour samples, root volume density, root weight density, cellulose content, and lignin content were higher at middle slope portions but there was no significant difference. (4) The root system could effectively improve the shear performance of the soil. The internal friction angle and cohesion of the root-soil matrix were higher than those of the bare ground control. Significant differences in cohesion was only observed for the up slope portion, between the terrace hedgerow and bare ground control, increasing by 45.67%. The internal friction angle and anti-scourability were better at middle and down slopes. Our study showed that the mechanical properties of the root-soil matrix were mainly affected by root volume density, root weight density, root surface area density, and cellulose content. In summary, the root diameter in the range $0.0 < d \leq 1.0$ mm substantially contributed to the mechanical properties of *Dolichos lablab* L. root and root-soil matrix. The anti-scourability of root-soil matrix was better at the middle and down slope portions; the shear performance of root-soil matrix was the best at the up slope portion, but anti-scourability was the worst. When promoting the planting of terrace hedgerows of *Dolichos lablab* L. soil and water conservation would be improved when they are planted in low and flat terrains (such as the middle and down slope portions).

Key Words: *Dolichos lablab* L.; terrace hedgerow; root length; cellulosic; shear strength; anti-scourability

喀斯特坡地不同于其他地区,具有独特的“二元三维”^[1]地质构造。地表水土流失严重,加之成土速率低、土层薄、土体与母岩之间存在明显软硬界面的特点^[1],一旦当地植被受到人为干扰破坏,水土流失加剧,原本处于平衡状态的生境将向石漠化方向演变^[2]。工程措施(如依自然地形建蓄水池、用挡墙维护落水洞等^[3])与植物措施(如关键点位布置植物、植物篱等)结合的方式^[4]最能有效缓解水土流失加剧的困境。地埂篱为植物篱中的一种,最初用于集水,20世纪初用于水土保持,主要通过根系及根对土体的加强达到固土作用^[5]。草本植物须根量大且根系集中分布于浅土层,其对薄土的固持效果较灌、乔木显著,这是由于深粗根($d > 2.0$ mm)在土体中起抗滑桩和扶壁的作用,而浅细根($d \leq 2.0$ mm)主要为三维加筋、固结土壤的作用^[6-7]。地埂篱根系主要通过三方面加强土体:1)通过穿插于土体中增大根与土粒、土粒与土粒间的摩擦力;2)根系分泌物促进土粒胶结作用,增加土体粘聚力和抗蚀性能;3)根系自身的抗拉、抗剪性能也能在一定程度上增强土体的抗剪、抗冲力^[8-10]。

拉巴豆(*Dolichos lablab* L.)为豆科蝶形花亚科菜豆族扁豆属,是热带、亚热带温暖地区优良的高营养高产牧草和蔬菜^[11],有较高的经济价值,较强的环境适应性和良好的水土保持功能。我国西南喀斯特地区地势偏远、环境恶劣、贫困率高,将拉巴豆应用于喀斯特坡地,既可带动经济发展又可保持水土。目前,西南地区虽已推广种植,但有关其生态效应的研究仅涉及根系生物特性^[12],根系的力学特性研究方面存在空白。已有研究证明不同植物根系具有不同的力学特性,即使同一种植物,在不同环境或于不同径级也存在较大差异^[13]。喀斯特植物根系主要受限于土壤厚度和水分,根系形态特征随着限制条件改变的同时,其化学成分和力学特性也随之改变^[13]。有关根系力学特征的研究表明根系抗拉特性(抗拉强度、延伸率、弹性模量等)与化学成分、微观结构皆存在一定的相关性^[13-18],但少见以岩溶地貌为背景的根系力学特性方面的研究^[6]。本文对喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根-土复合体在不同坡位的形态分布、力学和化学成分特征进行了综合分析,从不同坡位、不同径级根系之间各指标的相关性和差异性着手,探讨根及根-土复合体的力学特性及影响因素,旨在

探索拉巴豆地埂篱根系的水土保持潜能及在喀斯特地区推广价值,为喀斯特坡地科学实施水土保持措施提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市酉阳土家族苗族自治县泔溪镇龙潭槽谷,地处东经 $108^{\circ}58'$,北纬 $28^{\circ}58'$ (具体位置见图 1)。槽谷由背斜发育,谷底及顺层坡一侧为碳酸盐岩,黄壤,坡度 30° 左右。该区年均温 14.6°C ,年均降雨量 1200 mm ,年均日照时长 1131 h ,无霜期 261 d ,雨热同期,降雨主要集中于 5—9 月,属典型的中亚热带季风湿润气候。采样区处于顺层坡人工林坡面内,整个坡面植被覆盖率较低,主要为花椒经济林,另外存在少量抗旱、耐瘠薄野生乔灌木,如马尾松(*Pinus massoniana*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)等。

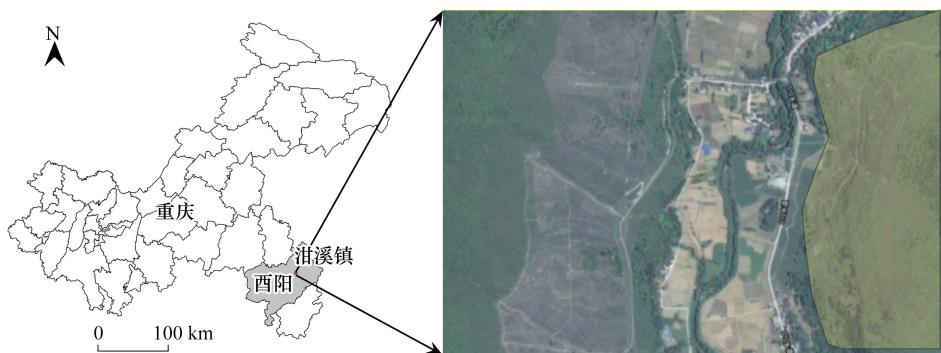


图 1 研究区位置图

Fig.1 Study area location map

黄色区域表示顺层坡研究区

1.2 样品采集

依据自然条件差异,坡面可划分为上、中、下三个坡位,上坡岩石裸露率及坡度明显大于中、下坡,而下坡土层最厚,相邻坡位间海拔相差约为 50 m 。2018 年 4 月于坡面的上、中、下坡位地埂位置撒播拉巴豆,播种密度 0.03 kg/m^2 (出苗率 80%左右),每个坡位篱带长约 200 m 、宽约 20 cm ,常规管护。

全根根系的采集:2018 年 7 月中旬取植株根系,采用挖掘法,每个坡位取 5 株标准株(标准株的选择参见[19]),为保证根系完整性,连根带土一并带回实验室。

根-土复合体的采集:每个坡位选取 3 个对照点(未播拉巴豆地段)和 3 个地埂篱地点(选点位于拉巴豆标准株附近)。对照裸地取样时将土壤表面的植株、枯落物等杂质清理干净,避开杂草根系用铝盒、容重环刀(底面积 20 cm^2 ,高 5 cm)、抗剪环刀(底面积 30 cm^2 ,高 2 cm)取土。地埂篱地取样时先将拉巴豆地上部分剪去,扒掉 2 cm 土层($0\text{—}2\text{ cm}$ 土层无根系生长),每个抗剪环刀均以植株为中心取样;采集抗冲环刀(长 $\times$ 宽 $\times$ 高: $20\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$)时选取植株密度相近的区域。对照裸地共计 36 个抗剪土样,地埂篱地共计 36 个抗剪土样和 9 个抗冲样。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤基础物理性质

土壤容重、孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度)、饱和含水量、田间持水量和自然含水率的测定采用环刀法^[20]。

1.3.2 根系形态指标

所取根土样品置于 0.05 mm 的网筛中用细弱的水冲洗,分离根土晾干表面水分,整个过程轻柔避免损伤

根系。根-土复合体中的根在抗剪、抗冲试验后再处理,所有根系试样尽快测定以得到最精确数据。采用 EPSON (PERFECTION C700) 扫描仪进行根系灰度扫描, WinRHIZO (Pro.2009) 根系分析系统进行分析,具体操作步骤和计算过程参考[10]。

1.3.3 根系化学成分

将全根根系样按 $0.0 < d \leq 0.5$ mm、 $0.5 < d \leq 1.0$ mm 两径级分类,每个大径级类再以每 0.1 mm 归为 1 个样本(大于 1.0 mm 径级以及某些样本的根量太少未测定);根土复合体每个采样点抗剪环刀(4 个)里的根系为 1 个样本、每个抗冲环刀的根系为 1 个样本。每个样本测定纤维素、半纤维素和木质素的含量,测定方法分别参考[21-23]。

1.3.4 单根抗拉特性指标

从全根根系中剪取顺直、直径较均一旦完好无损的根备用。拉伸试验夹具钳口处应力集中,为避免根皮受夹具应力破坏产生脱皮现象或皮断裂让试验机误记录为根断裂,在根两头包上医用橡皮胶,可分散夹具周边应力增加摩擦力提高试验成功率(拉伸断裂点位于根样中部视为试验成功),包上胶带后根系样本标距为 50 mm^[24]。采用测力范围 0—5 kN,加载速率范围 0—60 MPa/s,最小分度值 1×10^{-5} N 的微机控制电子万能试验机,夹具型号 DSA502A。样本试验前用精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺(型号 CD-6 ASX)测量根系上中下 3 个点位的直径取均值即为平均直径,拉伸速率设置为 7 mm/min(速率设置参考[25]),每次试验微机自动记录所有数据。

1.3.5 根-土复合体力学指标

土壤抗剪强度用 ZJ 型应变控制式直剪仪测定并根据库伦定律计算内摩擦角 φ 和粘聚力 c 。冲刷试验的冲刷槽坡度定为 30°,试验过程及测定方法见[10]。

1.4 数据处理

运用 Microsoft Office Excel 2013 和 SPSS 22.0 软件进行数据统计分析。进行了差异性检验(One-way ANOVA)、协方差分析(Multivariable)和相关分析(Spearman)。

2 结果与分析

2.1 根系形态与化学成分特征

2.1.1 根系形态特征

对各坡位全根根系进行形态指标统计以及差异性分析,得出(表 1):整体上 $d \leq 1.0$ mm 根系占优势,全根根系平均重量仅 1 mg 左右。各全根指标不同坡位之间均无显著性差异,同一径级指标在不同坡位,仅下坡根尖数(Root tips, RT)显著大于上、中坡,同一坡位 $0.0 < d \leq 0.5$ mm、 $0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级与其他径级除根体积(Root volume, RV)外均差异显著。

全根指标除 RT 外均于中坡出现最大值。根长(Root length, RL)和根表面积(Root surface area, RSA),下坡大于上坡;RT 呈现下坡>中坡>上坡的特征。径级指标显示: $0.0 < d \leq 0.5$ mm 径级所有指标均为下坡>中坡>上坡; $0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级仅 RT 下坡值最大,其余指标均为中坡>下坡>上坡。各坡位 RL、RT 最大值均出现在 $0.0 < d \leq 0.5$ mm 径级中,且 $0.0 < d \leq 0.5$ mm 径级显著大于其他径级;上、中坡 RSA 最大值在 $0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级,且 $0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级显著大于 $d > 1.0$ mm 各径级。 $0.0 < d \leq 0.5$ mm 径级指标与全根指标百分比,下坡较上、中坡高(增幅 3%—33%); $0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级指标与全根指标百分比,中坡较上、下坡高(增幅 5%—21%)。

结合采样情况和随机选取的根系灰度扫描图 2 和表 1、表 2 可知:拉巴豆侧根发达(尤其是上坡)、大部分向土层深厚的区域延展,主根较短且深度小于 15 cm,细根量大;中、下坡细根量较上坡大且 RL、RSA、RT 和根的分支均较上坡增加;上坡根系无根瘤菌而下坡根瘤菌明显。上坡土壤物理性质较差,容重大且与中、下坡有显著差异,总孔隙度、饱和含水量、田间持水量和自然含水率显著小于与中、下坡。由此可见土壤物理性质对

根系指标产生了一定的影响,透气性差且含水量低的上坡土壤,根系各项指标值均较小。

表 1 不同坡位拉巴豆根系全根与径级指标

Table 1 The whole root and diameter parameters of *Dolichos lablab* L. among different slope portions

根系指标 Root parameters	坡位 Slope position	全根指标 Whole root parameters	径级指标 Diameter parameters/mm				
			0.0<d≤0.5 mm	0.5<d≤1.0 mm	1.0<d≤1.5 mm	1.5<d≤2.0 mm	2.0<d≤2.5 mm
根长 RL	上坡	203.08±0.33A	77.95±56.28aA	45.95±24.35aA	5.54±2.36bA	1.51±1.03bA	0.70±0.33bA
Root length/cm	中坡	242.24±0.29A	154.50±104.95aA	67.03±33.89bA	10.92±3.54bA	3.11±1.26bA	1.22±0.57bA
	下坡	222.31±0.60A	158.62±73.61aA	46.10±30.58bA	13.09±13.76bA	2.67±2.82bA	1.40±0.82bA
根表面积 RSA	上坡	17.39±4.26A	6.06±3.97abA	9.79±5.02aA	2.07±0.91bcA	0.82±0.56cA	0.51±0.24cA
Root surface area/cm ²	中坡	19.04±2.86A	11.46±6.82abA	14.65±8.14aA	4.05±1.28cA	1.65±0.66cA	0.87±0.41cA
	下坡	17.47±4.40A	11.52±5.29aA	10.19±7.63aA	4.85±5.04bA	1.44±1.51bA	0.99±0.57bA
根体积 RV	上坡	0.63±0.15A	0.04±0.03aA	0.17±0.09aA	0.06±0.03aA	0.04±0.02aA	0.03±0.01aA
Root volume/cm ³	中坡	0.71±0.17A	0.08±0.05aA	0.27±0.16aA	0.12±0.04aA	0.07±0.03aA	0.05±0.02aA
	下坡	0.57±0.32A	0.08±0.04aA	0.19±0.15aA	0.14±0.15aA	0.06±0.07aA	0.06±0.03aA
根尖数 RT	上坡	347.80±287.34B	102.40±65.01aB	2.60±4.10bB	0.20±0.45bA	0.20±0.44bA	0.00bA
Root tips	中坡	525.00±360.57B	518.00±359.22aAB	4.60±2.79bB	0.80±0.84bA	0.00bA	0.00bA
	下坡	664.40±383.80A	651.80±380.29aA	9.80±3.83bA	1.60±1.67bA	0.00bA	0.00bA
根重 RW	上坡	1.08±0.33A	—	—	—	—	—
Root weight/mg	中坡	1.28±0.29A	—	—	—	—	—
	下坡	1.07±0.60A	—	—	—	—	—

表中数据为平均值±标准误差(n=5),不同小写字母表示同一指标不同径级间存在显著差异(P<0.05);不同大写字母表示同一指标不同坡位间存在显著差异(P<0.05)

表 2 顺层坡不同坡位地埂篱土壤的基本物理性质

Table 2 Physical properties of different slope portions at bedding slopes

坡位 Slope position	容重 Bulk density/ (g/cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary voidage/%	非毛管孔隙度 Noncapillary porosity/%	饱和含水量 Saturation moisture content/%	田间持水量 Field capacity/%	自然含水率 Soil moisture/%
上坡 Up	1.43±0.01a	46.12±0.00b	26.76±0.06a	19.37±0.06a	20.04±0.04b	18.82 ±0.06a	8.37±0.02b
中坡 Middle	1.26±0.07b	52.42±0.03a	33.03±0.05a	19.39±0.06a	31.56±0.03a	26.50±0.07a	38.79±0.21a
下坡 Down	1.30±0.03b	50.79±0.01a	36.54±0.03a	14.25±0.02a	32.27±0.03a	28.07±0.03a	12.69±0.01ab

表中数据为平均值±标准误差(n=9),不同小写字母表示同一指标不同坡位间存在显著差异(P<0.05)

2.1.2 根系化学成分特征

对根系纤维素(Cellulose,C)、半纤维素(Hemicellulose,H)、木质素(Lignin,L)含量进行测量,结果表明:纤维素含量均值中坡>上坡>下坡,木质素含量排序与纤维素相反,半纤维素含量于中坡值最大,上、下坡均值相近,但各化学成分于各坡位之间均无显著性差异。

将直径与这三个指标进行回归分析,回归方程见图 3。纤维素含量与直径的拟合曲线为幂函数关系,半纤维素、木质素含量与直径均为二次多项式函数关系。相关性分析得出,仅 0.0<d≤0.5 mm 径级的纤维素含量与直径呈显著负相关(Pearson = -0.830)。拟合曲线表明(图 3),0.0<d≤0.5 mm 径级纤维素含量变化较 0.5<d≤1.0 mm 径级大,范围在 35%—60%之间,纤维素含量随根径增粗而减小。两径级均显示木质素、半纤维素含量变化缓和,范围均在 20%—30%之间,木质素含量随直径增粗有缓慢增加趋势。

2.2 单根极限抗拉力与抗拉强度

试验成功的拉巴豆根系直径范围为 0.19—0.93 mm,平均值为 0.46 mm,试验成功率 65.52%。极限抗拉力范围为 1.06—18.56 N,均值 6.77 N。抗拉强度范围 6.97—57.50 MPa,均值 29.57 MPa。抗拉特性与直径的拟合方程均为幂函数形式,其指数表征极限抗拉力随直径的增长率、衰减率,系数可被视为比例因子^[26]。拟合

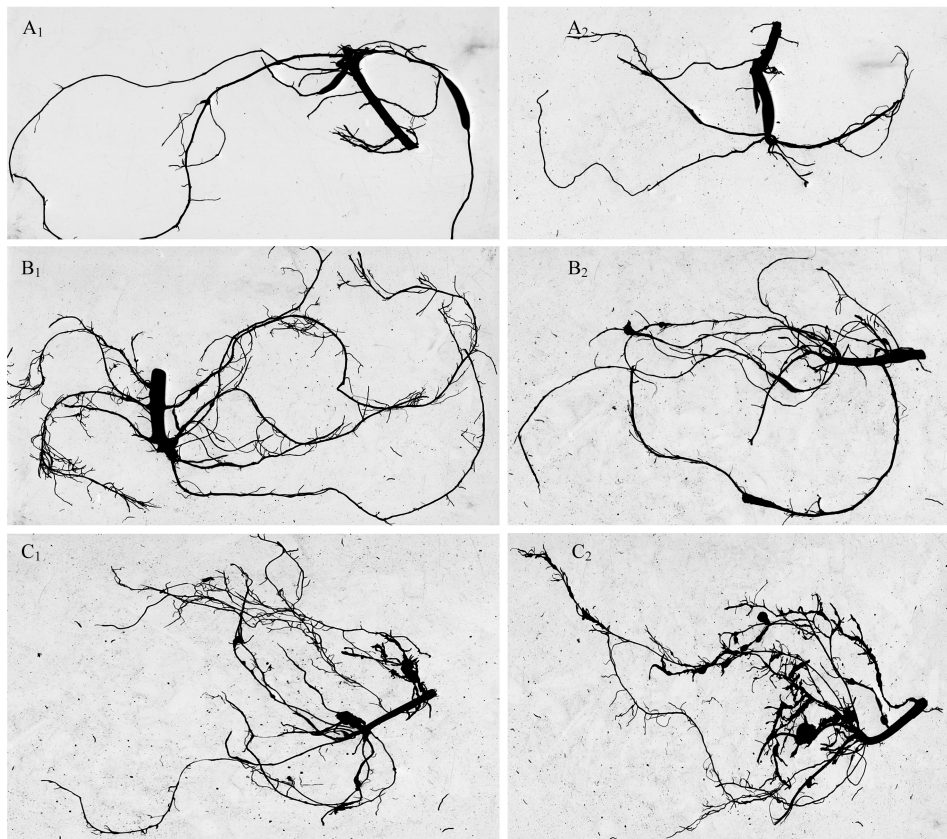


图2 拉巴豆根系灰度扫描图

Fig.2 Grayscale scan of *Dolichos lablab* L.

A₁、A₂表示上坡随机根系；B₁、B₂表示中坡根系；C₁、C₂表示下坡根系

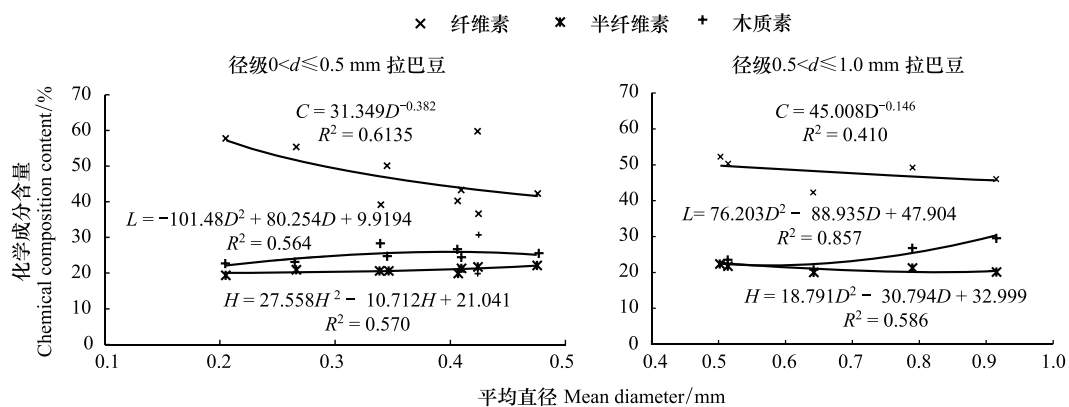


图3 不同径级根系化学成分含量与平均直径的关系

Fig.3 Relationships between root chemical composition content and different diameters

方程中不同坡位的指数和系数均有一定的差异,极限抗拉力与直径的拟合方程显示各坡位增长率相似,但下坡比例因子较上、中坡低;抗拉强度与直径拟合方程显示中坡较上、下坡衰减率高 0.80、1.67 倍,比例因子相似。虽同为一种植物,但其根系力学特性由于环境影响造成根系化学成分含量或粗细根比例不一致,从而导致不同坡位根系拟合方程常量的差异。

2.2.1 单根极限抗拉力及影响因素

拟合结果显示(图4),极限抗拉力与直径正相关,同一直径中坡>上坡>下坡。将直径和对应根系极限抗

拉力进行自然对数变换,以直径为协变量进行协方差分析,结果表明直径对极限抗拉力无显著影响。极限抗拉力上坡与中、下坡均有显著性差异。

回归分析表明(仅对存在显著相关关系的变量进行说明,表 3): $0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级木质素含量与极限抗拉力可用对数函数较好拟合($R^2 = 0.736$)且显著正相关(Pearson 系数为 0.736, $P < 0.05$);木纤比与极限抗拉力可用线性函数较好拟合($R^2 = 0.672$),同样为显著正相关(Pearson 系数为 0.820, $P < 0.05$)。综上,拉巴豆极限抗拉力受木质素含量影响较大,随木质素含量增大而增大,根系化学成分与极限抗拉力的相关度于 $0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级较高。

2.2.2 单根抗拉强度及影响因素

抗拉强度与直径负相关(图 4),协方差分析表明直径对抗拉强度有显著性影响($P < 0.05$)。 $0.0 < d \leq 1.0$ mm 径级随直径增大抗拉强度急剧减小,整体上中坡>上坡>下坡; $d > 1.0$ mm 径级随直径增大抗拉强度变化平缓,坡位排序为:上坡>中坡>下坡。由此可见抗拉强度受直径影响且对 $0.0 < d \leq 1.0$ mm 径级的变化更敏感。

回归分析表明(表 3): $0.0 < d \leq 0.5$ mm 径级的化学成分除半纤维素外均与抗拉强度呈显著或极显著相关。随纤维素含量增加,抗拉强度以对数函数增大(Pearson 系数为 0.920, $P < 0.05$);随木质素含量增加、木纤比增大,抗拉强度以对数函数减小(Pearson 系数分别为-0.971、-0.964, $P < 0.01$)。 $0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级木纤比与抗拉强度呈显著负相关(Pearson 系数为-0.880, $P < 0.05$)。综上,拉巴豆抗拉强度受纤维素、木质素共同影响,随纤维素含量增大而增大;根系化学成分与抗拉强度的相关度于 $0.0 < d \leq 0.5$ mm 径级更高。

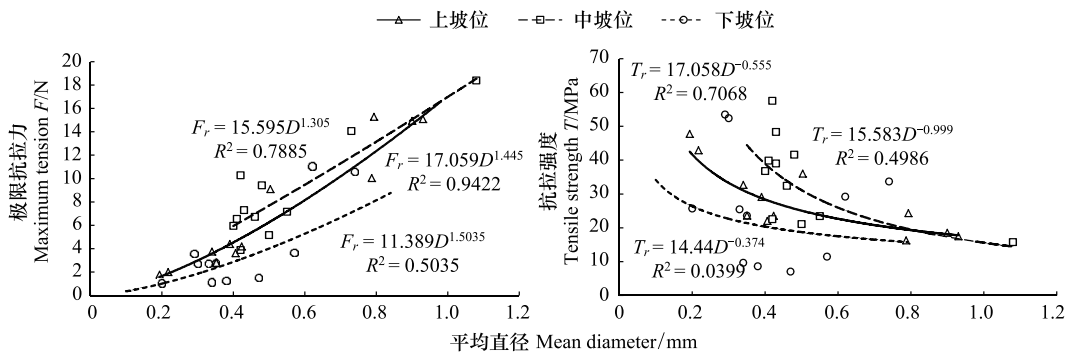


图 4 抗拉特性与直径在不同坡位的关系

Fig.4 Relationships between maximum tension, tensile strength and mean diameter of *Dolichos lablab* L. at different slope portions

表 3 拉巴豆根系抗拉特性与化学成分的拟合方程

Table 3 Regression equations between root tensile properties and chemical compositions of *Dolichos lablab* L.

径级 Diameter	根系化学成分 Root chemical compositions	极限抗拉力 Maximum tension F/N			抗拉强度 Tensile strength T/MPa		
		回归函数	R^2	Pearson	回归函数	R^2	Pearson
$0.0 < d \leq 0.5$ mm 径级	C;纤维素	$F_r = -3.864\ln(C) + 50.219$	0.270	-0.220	$T_r = 67.972\ln(C) - 230.66$	0.866	0.920 *
	L;木质素	$F_r = 0.9365\ln(L) + 24.565$	0.338	0.298	$T_r = -114.4\ln(L) + 399.09$	0.952	-0.971 **
	L/C;木纤比	$F_r = 0.0176(L/C) + 2.6245$	0.265	0.160	$T_r = -44.36\ln(L/C) + 207.3$	0.934	-0.964 **
	H;半纤维素	$F_r = -0.2834H + 20.588$	0.350	0.291	$T_r = -0.273H + 7493.9e$	0.212	-0.438
$0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级	C;纤维素	$F_r = -4.661\ln(C) + 61.419$	0.490	-0.111	$T_r = 30.156\ln(C) - 88.365$	0.120	0.370
	L;木质素	$F_r = 11.19\ln(L) - 2.936$	0.736	0.887 *	$T_r = -51.75\ln(L) + 192.95$	0.589	-0.684
	L/C;木纤比	$F_r = 0.3253(L/C) - 4.2534$	0.672	0.820 *	$T_r = -50.24\ln(L/C) + 223$	0.771	-0.880 *
	H;半纤维素	$F_r = -0.1864H + 23.463$	0.329	-0.573	$T_r = -0.2443H + 0.1517e$	0.510	-0.768

* 表示在 0.05 的水平上显著相关, ** 表示在 0.01 的水平上极显著相关

2.3 根-土复合体抗剪/冲性能特征

2.3.1 复合体中根的形态和化学成分特征

表 4 表明:根系形态指标中仅抗剪土样根表面积密度(Root surface area density, RSAD)上坡显著大于中、下坡,根重密度(Root weight density, RWD)上坡显著大于中坡。抗冲土样坡位间的根系形态指标均无显著性差异。根-土复合体抗剪土样的根系形态指标均为上坡>下坡>中坡而抗冲土样形态指标于中、下坡较高。具体表现为抗冲土样根系 RSAD 于下坡值最大,根体积密度(Root volume density, RVD)、RWD 于中坡值最大;抗剪土样根系指标于各坡位呈现与抗冲土样根系和全根根系指标相反的规律。由此可见,不同坡位土层厚度的差异,影响着根系生长分布。较厚土层根系舒展从而更加分散、扎根更深,较薄土层(如上坡),根系相对集中于表土层,所以上坡抗剪土样根量较中、下坡大,各指标值亦较高。

抗剪土样仅上坡木纤比显著大于下坡,其他指标均无显著性差异。抗冲土样各指标均无显著性差异。总体上抗剪和抗冲土样中、下坡根系纤维素含量均较上坡高;而抗剪与抗冲土样木质素含量排序分别为中坡>上坡>下坡、下坡>中坡>上坡;抗剪土样木纤比和木质素含量排序一致。结合全根根系的形态指标再次表明,纤维素含量与根系径级有一定的相关性,中、下坡细根量大,其纤维素含量也表现出更高的水平。

表 4 不同坡位抗剪、抗冲土样根系形态与化学成分指标

Table 4 Root morphology parameters and chemical compositions of root-soil matrix at different slope portions

处理 Treatment	坡位 Slope portion	根长密度 Root length density/ (10^{-3} cm/cm ³)	根表面积密度 Root surface area density/ (10^{-3} cm ² /cm ³)	根体积密度 Root volume density/ (10^{-3} cm ³ /cm ³)	根重密度 Root weight density/ (10^{-3} mg/cm ³)	纤维素 Cellulose/%	木质素 Lignin/%	木纤比 Wood fiber ratio	半纤维素 Hemicellulose/%
抗剪根系 Shear strength samples	上坡	949.69±11.80a	74.30±1.20a	2.93±0.74a	2.96±1.04a	47.50±8.13a	21.84±1.59a	46.74±10.6a	20.67±2.12a
	中坡	857.58±36.77a	67.95±1.36a	0.67±0.08b	0.67±0.13b	47.84±9.71a	21.97±2.37a	47.46±10.65ab	17.88±1.61a
	下坡	894.82±25.84a	72.86±3.01a	0.86±0.12b	1.27±0.18ab	49.35±2.31a	20.64±0.38a	42.14±1.18b	20.63±3.29a
抗冲根系 Anti-scour samples	上坡	129.03±2.51a	9.51±0.12a	0.55±0.03a	1.03±0.25a	45.37±0.01a	21.32±0.27a	47.08±0.02a	19.92±0.03a
	中坡	123.54±0.28a	9.50±0.02a	0.61±0.09a	1.52±0.20a	51.87±0.04a	22.22±0.09a	43.94±0.11a	20.53±0.02a
	下坡	125.16±1.45a	9.61±0.03a	0.41±0.05a	0.85±0.23a	50.63±0.02a	23.22±0.02a	46.06±0.06a	19.70±0.01a

表中数据为平均值±标准误差(n=3),不同小写字母表示同一指标不同坡位间存在显著差异(P<0.05)

2.3.2 复合体的抗剪强度指标及影响因素

表 5 中地埂篱地的内摩擦角、粘聚力(下坡除外)均大于对照裸地,仅上坡粘聚力与对照裸地存在显著性差异。中坡粘聚力显著小于上、下坡且减幅高达 1 倍以上。数值上内摩擦角排序:中坡>下坡>上坡,坡位间波动幅度较小,对照裸地与地埂篱地均值分别为 85.42°、86.08°;粘聚力排序:上坡>下坡>中坡,对照裸地与地埂篱地均值分别为 27.60 kPa、36.92 kPa,地埂篱地较对照粘聚力的增幅最高达 45.67%。

相关性分析得出(表 6):上坡复合体内摩擦角与 RVD、RWD 呈显著和极显著正相关,上、中坡粘聚力与 RVD 呈显著负相关。RLD 和 RSAD、RVD 和 RWD 总是与抗剪指标有一致或相似的相关关系,如各坡位的内摩擦角与 RLD、RSAD 都呈负相关,与 RVD、RWD 均呈正相关。

表 5 不同坡位根-土复合体抗剪强度指标和抗冲指标

Table 5 The shear strength and anti-scourability index of root-soil matrix at different slope portions

坡位 Slope position	内摩擦角 φ Internal friction angle/°		粘聚力 c Cohesion/kPa		抗冲指数 AS Anti-scourability/ (L/g)
	对照裸地	地埂篱地	对照裸地	地埂篱地	
上坡 Up	81.95±5.91aA	83.38±3.18aA	28.79±1.63bB	52.99±10.18aA	4.98±0.36a
中坡 Middle	88.40±0.21aA	88.65±0.13aA	17.82±1.19cA	18.99±0.91cA	9.95±2.86a
下坡 Down	85.90±0.81aA	86.22±1.47aA	40.35±1.38aA	38.77±1.78bA	10.29±1.34a

表中数据为平均值±标准误差(n=3),不同小写字母表示同一指标不同坡位间存在显著差异(P<0.05);不同大写字母表示同一指标的对照与地埂篱地间存在显著差异(P<0.05)

2.3.3 复合体的抗冲指数及影响因素

抗冲指数均值排序(表5):下坡>中坡>上坡,坡位之间的数值变幅在0.34—5.31之间。差异性检验表明,在抗冲指数动态变化过程中 $t=4\text{ min}$ 时各坡位之间有显著性差异。冲刷过程中各坡位复合体抗冲指数均呈波状变化(图5),冲刷初期抗冲指数值最低,上、下坡抗冲指数峰值较中坡延迟4 min,各坡位均呈先增后减再平缓波动上升趋势。冲刷初期由于表层土壤基本无根系且多浮土所以流失土量大;随着时间增加抗冲指数先增后减,这个过程主要是根系起到的缓冲作用;随后泥沙量渐渐变少,抗冲指数基本处于缓升趋势。整体来看,中、下坡复合体抗冲性能较优,上坡抗冲指数小其波动幅度也较小。

抗冲指数受RSAD和纤维素影响(表6),中、下坡抗冲指数与RSAD呈显著正相关、与纤维素呈显著或极显著负相关关系。纤维素和木质素含量与抗冲指标有相反的相关关系,如抗冲指数与纤维素含量呈负相关,却与木质素含量呈正相关。

表6 不同坡位根-土复合体抗剪强度指标和抗冲指标与根系形态指标、化学成分相关关系

Table 6 Correlation analysis between shear strength parameters, anti-scourability, and root morphology paratemns, chemical compositions at different slope portions

指标 Parameters		根长密度 Root length density	根表面积密度 Root surface area density	根体积密度 Root volume density	根重密度 Root weight density	纤维素 Cellulose	木质素 Lignin	木纤比 Wood fiber ratio	半纤维素 Hemicellulose
内摩擦角 Internal friction angle	上坡	-0.383	-0.698	0.997 *	0.998 **	0.440	0.471	-0.096	-0.781
	中坡	-0.993	-0.841	0.735	0.897	-0.987	0.158	-0.731	-0.753
	下坡	-0.620	-0.516	0.780	0.835	-0.021	0.030	-0.213	0.988
粘聚力 Cohesion	上坡	0.624	0.869	-0.980 *	-0.960	-0.641	-0.248	0.329	0.907
	中坡	0.619	0.977	-0.971 *	-0.946	-0.947	-0.317	0.610	-0.850
	下坡	0.602	0.920	-0.937	-0.908	-0.834	-0.861	0.940	-0.660
抗冲指数 Anti-scourability	上坡	-0.590	0.741	0.807	0.739	-0.906 *	0.762	0.663	0.140
	中坡	-0.200	0.985 *	0.964	0.971	-0.990 **	0.955	0.999 *	-0.987
	下坡	-0.390	0.833 *	0.810	0.775	-0.916 *	0.885	0.946	-0.116

* 表示在 0.05 的水平上显著相关, ** 表示在 0.01 的水平上极显著相关

3.3 讨论

3.1 拉巴豆根系形态分布及影响因素

喀斯特地区植物根系为适应土壤和水分异质性强(高位、陡坡土薄缺水)的环境,形成了自身响应机制^[7,27]。研究区中拉巴豆根系的形态与分布在不同坡位产生了空间变异。全根和径级指标均表现为中、下坡大于上坡; $0.0<d\leq0.5\text{ mm}$ 、 $0.5<d\leq1.0\text{ mm}$ 径级所有指标(除根体积外)均显著大于其他径级指标。喀斯特地区干旱环境中的草本植物根系于土层厚、水分足的区域较繁茂,细根生长旺盛且根量显著大于粗根,这是一种通过提高细根生物量、周转率从而提高对土壤水、养分的吸收能力的自救机制^[27-28]。在容重大、含水量低的上坡,短期水分胁迫会诱导根系伸长吸收深处岩隙水^[28],为扎深汲水,根系分支率将降低、根尖数将变少,最终表现出根系各指标均较低的特征。

喀斯特坡地土储量的空间变异可通过根系在土体中的分布深度与集中程度反演获知。上坡地势高、水土

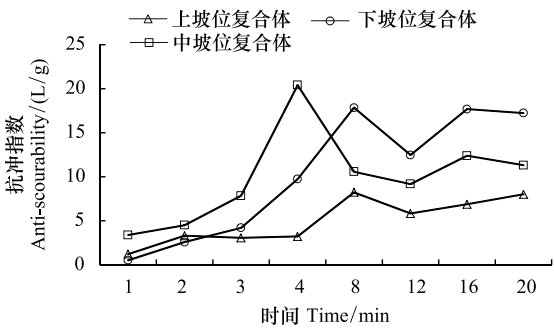


图5 不同坡位土壤抗冲指数动态变化
Fig. 5 Dynamic changes of Anti - scourability at different slope portions

流失动力潜能大且侵蚀力较强,所以土层最薄,中坡接收上坡流失物质后土层增厚,形成与下坡相似甚至更优的土壤条件。本研究得出抗剪土样根系总体指标排序均为上坡>下坡>中坡,看似有悖于全根根系形态指标规律,实则反映不同坡位根系分布随土储量的变化:上坡土层薄,根系相对集中;中坡土层厚,根系相对舒展分散;下坡与中坡土层厚度相似,根系亦相对分散。

结合土壤物理性质发现,根系与土壤的交互作用形成了一个正反馈机制:根量较大、细根量多、形态指标较优的中、下坡,土壤容重、总孔隙度、饱和含水量和田间持水量均较上坡优,土壤物理性质优良又促进根系的分化发育。由此可见,植物根系形态特征与地势、土壤厚度、土壤水有一定的关联^[13,29]。

3.2 拉巴豆根系抗拉特性及影响因素

草本根系抗拉试验成功率一般在 60%—75%^[17,25] 范围内,拉巴豆根系试验成功率为 65.52%,相较灌乔木根系成功率高^[18,30-31]。拉巴豆平均抗拉强度 29.57 MPa,约为狗牙根($d \leq 1.5$ mm)的 1.16 倍、马唐($d \leq 1.5$ mm)的 2.03 倍^[17,32],可见拉巴豆根系有较好的生物力学特性。不同坡位根系抗拉特性指标与直径的拟合方程虽均为幂函数相关,但其常数存在一定差异,这种现象可归结为环境影响了粗、细根的比例和根系化学成分含量,同时试验误差产生相较真实值一定程度的偏移^[30]。不同径级根系抗拉特性指标与化学成分含量的回归方程常数的差异也存在实验误差影响,具体影响因素和变化机制还有待验证。

本研究中拉巴豆根系极限抗拉力随直径增大而增大,抗拉强度随直径减小而增强,这与大部分草、灌根系力学特性一致^[8,25]。极限抗拉力均与木质素含量和木纤比正相关,抗拉强度与纤维素含量正相关、与木质素和木纤比负相关。大量研究得出同样结论^[8,17,32],而某些研究却指出抗拉强度与纤维素含量存在负相关关系^[15],以及抗拉特性与化学成分无相关关系的结论^[33]。关于抗拉特性与化学成分关系不一的本质原因目前存在这样的解释:根系维管束中木质部与韧皮部的化学成分含量存在差异,且在增粗生长的动态变化过程中木质部与韧皮部的分化速率不同从而导致不同物种或同一物种不同径级抗拉特性与化学成分关系的变化^[15]。还有研究指出环境因素间接影响木质部中成分含量^[13],生长于山脊、坡地等分散地形的根系相较于平地、沟谷地等汇聚地形的强度更大,其原理在于较大应力环境下根系木质部的木纤比降低、纤维素局部积累,从而使根系抗拉强度变大^[13,33]。

3.3 拉巴豆根-土复合体力学特性及影响因素

根-土复合体相较对照裸地内摩擦角和粘聚力均增大,内摩擦角排序:中坡>下坡>上坡,粘聚力:上坡>下坡>中坡。大量研究指出草本根系能有效提高土体抗剪强度^[9,34]。剪切过程,根系与土颗粒表面摩擦力及颗粒间嵌入作用产生的咬合力影响内摩擦角大小,分泌物与土壤颗粒间胶结作用影响粘聚力大小^[9],所以内摩擦角、粘聚力一般随根长密度、根表面积密度的增大而增大^[8-9]。本研究显示上坡复合体较另两坡位粘聚力更大,这与根系形态指标变化一致:上坡复合体根系形态指标均较大,根体积密度、根重密度尤其突出(均较中、下坡大 1.5 倍以上,且有显著性差异)。但相关分析得出上坡根系形态指标与粘聚力无显著相关,甚至负相关(根体积),这表明粘聚力并非受根系影响。本研究中拉巴豆生长时间较短,单位土体根量少,对土体的抗剪性能影响未达显著水平,或土壤类型差异导致粘聚力受其他因素影响更突出。已有研究证明含水率也显著影响粘聚力,随含水率增加,粘聚力呈先增后减的变化趋势(达峰值时含水率为 20%^[35])。由中坡根量大但含水率太高(接近峰值含水率的两倍)最终粘聚力表现最差,猜想本研究的粘聚力受含水率影响更大。

抗冲指数与形态指标和化学成分相关分析表明,其仅受根表面积、纤维素影响。相关研究表明不同背景环境或土壤类型影响抗冲指数的因素存在差异,土壤物理性质(容重、总孔隙度、细砂粒含量等)^[36]、有机质^[9]、毛根量^[34]、毛根形态指标(根长、根表面积等)^[37]均被证明与抗冲指数相关。本研究抗冲指数呈波动变化并最终平稳上升,这与杨玉梅等^[37]在四川雅安黄壤研究区的结论类似,谌芸等^[10]于紫色土区得出抗冲指数动态变化可用对数函数或二次函数较好拟合,不同土壤类型为产生差异的主要原因。

4 结论

1) 拉巴豆根系全根指标中根长、根表面积、根体积、根重均表现为中坡>下坡>上坡; $0.0 < d \leq 0.5$ mm 径级

指标均于下坡表现最优, $0.5 < d \leq 1.0$ mm 径级指标均中坡最优。 $0.0 < d \leq 1.0$ mm 径级指标中根长、根表面积、根尖数均显著大于其他径级。根系直径仅与纤维素含量显著负相关,与木质素、半纤维素含量相关性不明显。

2) 抗拉强度与直径呈幂函数负相关;抗拉强度与纤维素呈对数函数正相关、与木质素和木纤比均呈对数函数负相关;极限抗拉力与木质素呈对数函数正相关、与木纤比呈线性函数正相关。总体上抗拉强度与较细径级、极限抗拉力与较粗径级的化学成分相关度更高。

3) 复合体根系形态指标均于上坡的抗剪土样出现最大值,而抗冲土样于中、下坡值较大。仅上坡抗剪土样的根体积密度和根重密度显著大于中、下坡。化学成分指标中抗剪、抗冲土样纤维素含量均于中、下坡值较高。仅上坡抗剪土样的木纤比显著大于中、下坡。

4) 复合体内摩擦角、粘聚力均较对照裸地增大,但仅上坡位的粘聚力显著大于对照。内摩擦角随根体积密度、根重密度增大而增大,粘聚力随根体积密度增大而减小。抗冲指数随根表面积密度增大而增大、随纤维素含量增大而减小。

参考文献 (References):

- [1] 贾金田, 付智勇, 陈洪松, 王克林, 周卫军. 喀斯特坡地基岩起伏对土壤剖面水分格局的影响. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1708-1714.
- [2] 李阳兵, 王世杰, 李瑞玲. 岩溶生态系统的土壤. 生态环境, 2004, 13(3): 434-438.
- [3] 李晋, 熊康宁, 王仙攀. 喀斯特地区小流域地下水流失观测研究. 中国水土保持, 2012, (6): 38-40.
- [4] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 曹建华, 覃星铭, 李衍青, 杨奇勇. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究. 地球学报, 2014, 35(5): 535-542.
- [5] 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: 122.
- [6] 汪三树. 重庆市坡耕地典型生物埂固土保土机理与适宜性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [7] 苏樑, 宋同清, 杜虎, 曾馥平, 王华, 彭晚霞, 张芳, 张家涌. 喀斯特峰丛洼地不同植被恢复阶段细根生物量、形态特征及其影响因素. 应用生态学报, 2018, 29(3): 783-789.
- [8] 邓佳. 南方红壤区常见草本根系复合体生物力学抗蚀机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015: 81.
- [9] 李建兴. 三峡库区不同护坡草本植物根系的固土抗蚀效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013: 72.
- [10] 湛芸, 何丙辉, 陈彩霞, 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): 5173-5181.
- [11] Kanani J, Lukefahr S D, Stanko R L. Evaluation of tropical forage legumes (*Medicago sativa*, *Dolichos lablab*, *Leucaena leucocephala* and *Desmanthus bicornutus*) for growing goats. Small Ruminant Research, 2006, 65(1/2): 1-7.
- [12] 韩玉竹. 拉巴豆优良根瘤菌的筛选及接种效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012: 142.
- [13] Hales T C, Ford C R, Hwang T, Vose J M, Band L E. Topographic and ecologic controls on root reinforcement. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2009, 114(F3): F03013.
- [14] 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.
- [15] 吕春娟, 陈丽华. 华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系. 农业工程学报, 2013, 29(23): 69-78.
- [16] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 李国荣, 张兴玲, 陈桂琛. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系. 农业工程学报, 2009, 25(5): 40-46.
- [17] 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. 农业工程学报, 2007, 23(9): 7-12.
- [18] 田佳, 曹兵, 及金楠, 李才华, 朱莉, 马尼园. 防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性. 农业工程学报, 2014, 30(23): 192-198.
- [19] 伯姆 W. 根系研究法. 薛德榕, 谭协麟, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 231.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978.
- [21] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000. 211-212.
- [22] 波钦诺克 X H. 植物生物化学分析方法. 荆家海, 丁钟荣, 译. 北京: 科学出版社, 1981. 173-176.
- [23] Lin S Y, Dence C W. Methods in Lignin Chemistry. Berlin, Heidelberg: Springer, 1992.
- [24] Lateh H, Avani N, Bibalani G H. Tensile strength and root distribution of *Acacia mangium* and *Macaranga tanarius* at spatial variation (case study: east-west highway, Malaysia). International Journal of Biosciences, 2015, 6(7): 18-28.
- [25] Zegeye A D, Langendoen E J, Tilahun S A, Mekuria W, Poesen J, Steenhuis T S. Root reinforcement to soils provided by common Ethiopian highland plants for gully erosion control. Ecohydrology, 2018, 11(6): e1940.
- [26] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, Speziali B, Vitali B, Vullo P, Zocco A. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy

- (northern Italy). *Plant and Soil*, 2005, 278(1/2): 11-22.
- [27] 梁千慧. 不同水分条件下黑麦草对喀斯特土壤深度的生长与生理响应[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 73.
- [28] 刘锦春, 钟章成. 水分胁迫和复水对石灰岩地区柏木幼苗根系生长的影响. *生态学报*, 2009, 29(12): 6439-6445.
- [29] Genet M, Li M C, Luo T X, Fourcaud T, Clément-Vidal A, Stokes A. Linking carbon supply to root cell-wall chemistry and mechanics at high altitudes in *Abies georgei*. *Annals of Botany*, 2011, 107(2): 311-320.
- [30] Genet M, Stokes A, Salin F, Mickovski S B, Fourcaud T, Dumail J F, van Beek R. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots//*Proceedings of the First International Conference on Eco-Engineering*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007: 3-11.
- [31] Ji J N, Kokutse N, Genet M, Fourcaud T, Zhang Z Q. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2012, 92: 139-154.
- [32] 叶超, 郭忠录, 蔡崇法, 闫峰陵, 马中浩. 5 种草本植物根系理化特性及其相关性. *草业科学*, 2017, 34(3): 598-606.
- [33] Abdi E, Azhdari F, Abdulkhani A, Soofi Mariv H. Tensile strength and cellulose content of Persian ironwood (*Parrotia persica*) roots as bioengineering material. *Journal of Forest Science*, 2014, 60(10): 425-430.
- [34] 李谦, 周本智, 安艳飞, 徐升华. 绿竹根系分布及生物力学性质. *应用生态学报*, 2014, 25(5): 1319-1326.
- [35] 宗全利, 冯博, 蔡杭兵, 陈志康, 王建新. 塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(5): 1290-1300.
- [36] 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.
- [37] 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. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 64-68.