

DOI: 10.11686/cyxb2021185

http://cyxb.magtech.com.cn

甘凤玲, 韦杰, 李沙沙. 紫色土埂坎典型草本根系摩阻特性对土壤含水率的响应. 草业学报, 2022, 31(7): 28—37.

GAN Feng-ling, WEI Jie, LI Sha-sha. Response of root-soil friction characteristics of three common grasses to soil water content in purple soil bunds. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(7): 28—37.

紫色土埂坎典型草本根系摩阻特性 对土壤含水率的响应

甘凤玲^{1,2}, 韦杰^{1,2*}, 李沙沙²

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要:为进一步探索紫色土埂坎草本根—土界面摩阻特性与土壤含水率的关系,以紫色土埂坎常见稗草、马唐和牛筋草 3 种草本根系为研究对象,设置不同土壤含水率(5%、10%、15%、20% 和 25%),通过直剪和拉拔摩阻试验测定草本根—土复合体的摩阻特性指标(黏聚力、摩擦系数、最大抗拔力和抗拔强度),分析了土壤含水率对不同草本根—土界面摩阻特性的影响。结果表明:1)当含水率为 15% 和 20% 时,根—土界面黏聚力达到较小值,而摩擦系数、最大抗拔力和抗拔强度达到较大值。2)3 种草本根—土界面拉拔摩阻特性差异显著($P < 0.01$),牛筋草根—土界面平均最大抗拔力和抗拔强度分别是马唐的 1.18 和 1.30 倍,是稗草的 1.14 和 1.10 倍。3)草本根—土界面间抗剪强度和垂直荷载的关系服从莫尔—库伦准则。当含水率为 20% 和 25% 时,根—土界面间抗拔力达到较大值。4)在相同垂直荷载和土壤含水率条件下,牛筋草根—土界面抗剪强度显著高于马唐和稗草($P < 0.05$)。由此可知,牛筋草根系能增强紫色土埂坎稳定性,其根系对埂坎的加固作用约在土壤含水率为 15% 时效果最佳。研究结果可为三峡库区紫色土埂坎固埂护坡草本植物的筛选提供参考。

关键词:紫色土埂坎;根—土界面;根系;摩阻特性;土壤含水率

Response of root-soil friction characteristics of three common grasses to soil water content in purple soil bunds

GAN Feng-ling^{1,2}, WEI Jie^{1,2*}, LI Sha-sha²

1. School of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China

Abstract: This study aimed to elucidate the reinforcement effect of grass roots on purple soil bunds. Three grasses commonly found growing on purple soil bunds (*Echinochloa crusgalli*, *Digitaria sanguinalis* and *Eleusine indica*) were studied. Soil is a material that cannot withstand tension but can withstand pressure, while the root system within the soil can withstand tension to some extent. When external force is applied, the contact interface between the root system causes roots and soil to dislocate each other and generate frictional resistance and aspects of this root-soil interaction were measured for roots artificially packed into specially constructed test apparatuses. Root systems were harvested from the field and manually packed into the test apparatuses. Parameters measured included: resistance to shear force under vertical load (5 pressures ranging from 25 to 150 kPa), maximum force (N) to pull

收稿日期:2021-05-07;改回日期:2021-09-23

基金项目:重庆市杰出青年科学基金项目(cstc2019jcyjX0025),重庆英才青年拔尖人才项目(CQYC201905009),重庆市教委科技项目(KJZD-K201800502;KJQN201800531)和四川省科技计划(2020YFQ0002)资助。

作者简介:甘凤玲(1989-),女,重庆大足人,讲师,博士。E-mail: 359140315@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: wei_jie@mails.ucas.ac.cn

packed roots out of the test apparatuses, and tensile strength (MPa) of the roots in the test conditions. Tests were conducted under five soil water contents (5%, 10%, 15%, 20% and 25%) and the root-soil friction characteristics of the three grasses were examined by direct-shear force tests and ‘pull-out’ (extraction) force tests. In addition, the mechanisms of interaction between grass roots and soil during the friction test process were analyzed. It was found that: 1) There was a significant difference between the three grasses in extraction friction force ($P < 0.01$). The maximum pulling force of *E. indica* was on average 1.18 times greater than that of *D. sanguinalis* which in turn was 1.14 times higher than that of *E. crusgalli*. Similarly, the tensile strength of *E. indica* was on average 1.30 times higher than that of *D. sanguinalis* which in turn was 1.10 times higher than that of *E. crusgalli*. 2) The root-soil friction characteristics of the three tested grasses showed significant differences across the five different soil water contents tested ($P < 0.05$). At a soil water content of 15%–20%, the cohesion of the tested grass root-soil interface was relatively lower than at the other soil water contents, while the friction coefficient tended to be a maximised. In addition, the maximum extraction force and tensile strength of root-soil interface occurred at a soil water content of 15%. 3) The constitutive relationship between the shear strength at the root-soil interface and vertical load can be described by a hyperbolic model that satisfies the Mohr-Coulomb criterion. The shear strength of the root-soil interface reached a maximum at a soil water content of 20%–25%. 4) Under the same vertical load and soil water content, the shear strength of the goosegrass root-soil interface was significantly higher than that of *D. sanguinalis* and *E. crusgalli* ($P < 0.05$). It can thus be concluded that among the three tested grasses herbs, *E. indica* had the most significant effect on enhancing soil shear strength, followed by *D. sanguinalis* and *E. crusgalli*. These results provide scientific data to assist with selection of grass species for soil-fixation to protect purple soil bunds.

Key words: purple soil bunds; root-soil interface; herb roots; root-soil friction; soil water content

埂坎是坡耕地高出田面的地埂与其外侧坡坎的复合体,对坡耕地土壤侵蚀具有重要的阻控作用^[1]。埂坎自身稳定性对其水土保持作用发挥具有重要影响,利用植物根系防治埂坎垮塌、坡面水土流失等方面的研究受到了国内外学者广泛关注^[2–3],如在 20 世纪 80 年代初,国内外学者对植物根系固土力学机制和原理展开了相关研究^[4–5]。研究表明,植物根系可通过其垂直深粗根系、浅细根系和水平深粗根对土体进行锚固、加筋和牵拉,有效提高土体的应力应变状态,并加强土体稳定性^[6–7]。此外,土壤是一种不可承受拉力却可承受压力的材料,而根系在土壤中可以承受一定拉力。在外力条件下,根系和土壤接触界面发生相互错动,并产生摩擦阻力进行抵抗,根系抗拉特性与土体抗压特性相结合也增加了根—土界面间的抗剪强度和土体稳定性^[8]。因此,根—土界面摩阻特性决定了根系固土机制,研究根—土界面的摩阻特性对紫色土壤埂坎防护和植物配置具有重要意义。

近年来关于摩阻特性的研究大部分集中在土工合成材料与填料之间的界面^[9–18],而关于根—土界面间的摩阻特性报道较少。已有研究主要利用直剪试验和拉拔试验研究根—土界面摩阻特性^[9–12]。宋维峰等^[13]和邢会文等^[14]首次通过剥皮制样的方法测定根—土界面间的相互作用力,研究表明根系种类、土壤含水率和土壤干密度会对根—土界面的剪切特性产生影响。田佳等^[15]借鉴上述方法,通过室内直剪试验研究了土壤含水率对花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙柳(*Salix cheilophila*)根—土界面的影响,研究发现,土壤含水率高(22%)的土壤抗剪强度高于土壤含水率低(2%)的。不同根系表面积下的根—土界面的抗拔摩阻特性也有所差异,如刘亚斌等^[16]对灌木植物根系进行了拉拔摩擦试验,研究发现根系总表面积越大,根—土界面的抗拔强度越大。此外,杜金辉等^[17]还通过开展根—土界面摩阻效应试验构建了根系抗拉拔力的模型。

综上,不同植物种类的根系生物特性有所不同,其根系固土护坡效益也有差异^[18–20]。本研究以三峡库区紫色土壤埂坎常见的稗草(*Echinochloa crusgalli*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)和牛筋草(*Eleusine indica*)为研究对象,通过室内根—土界面直剪摩阻试验和抗拉拔摩阻试验,分析 3 种草本根—土界面摩阻特性,探讨不同土壤含水率对草本根—土界面摩阻特性的影响,以期对进一步深入探讨固埂护坡草本植物的配置和埂坎修建与维护提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区歇马镇,介于 $106^{\circ}18'02''$ — $106^{\circ}40'57''$ E, $29^{\circ}27'08''$ — $30^{\circ}05'08''$ N, 高程200~900 m。地处四川盆地东部平行岭谷区,属亚热带湿润性季风气候,年均降水量1105.4 mm,年均气温 18.3°C ,降水主要集中在5—8月,占全年降水量的57.7%,且多以阵雨和暴雨形式出现^[21]。土壤以紫砂壤土为主,富含钾、钙、锰、铁等矿质元素。主要种植作物有柑橘(*Citrus reticulata*)、黄豆(*Glycine max*)和玉米(*Zea mays*)等。对该区现有坡耕地埂坎类型调查表明,埂坎类型以土坎为主。主要固坎草本植物有稗草、马唐、牛筋草、狗牙根(*Cynodon dactylon*)等,通过调查可知,埂坎的土壤含水率在旱季和雨季的变化范围为1.87%~28.78%。

1.2 试验材料采集

2019年7—9月在北碚区歇马镇选择稗草、马唐和牛筋草盖度超过60%的典型土埂坎进行采样。在埂坎内选择16株生长良好的草本植物,去除草本植物地表部分后,以草本植物为中心点,将环刀放至中心点附近,竖直向下分层采集原状根—土复合体(每层为10 cm,共3层),每层取3次重复,共计144个土样,测量不同土层厚度下的根系直径、长度等参数,其中稗草、马唐和牛筋草平均直径分别为0.40、0.72和0.71 mm,平均长度分别为43.70、354.87和276.21 mm,平均分形维数为1.55、1.45和1.77,平均土壤含根量分别为0.49、0.16和0.36根· cm^{-3} (图1),所采集信息作为本研究中重塑根—土复合体的参考资料。另在每个采样点采集500 g的散土样带回实验室,用于测定相对应的土壤理化性质和制作重塑土的材料(表1)。在对土样进行取样的同时对草本植物根系进行挖掘,在根系结点处将其剪断,并用塑料薄膜缠绕密封后,放置在 4°C 环境下保存。



图1 草本根系结构

Fig. 1 Herbs root structure

表1 埂坎原状土壤理化性质

Table 1 Soil chemical and physical properties of undisturbed soil bunds

土壤质量含水率 Soil mass moisture content (%)	黏粒 Clay (%) <0.002 mm	粉粒 Silt (%) 0.002~0.05 mm	砂粒 Sand (%) >0.05~2 mm	pH	有机质 Organic matter (%)
5.37±0.11	10.77±0.03	69.47±0.12	19.76±0.14	6.14±0.02	1.49±0.11

1.3 重塑土样品制备

试验用土均为埂坎采样点的土壤,土样风干后过2 mm筛,测定风干土含水率 $[(5.1\pm0.48)\%]$ 后放入密封箱中备用。按照《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》^[22]进行重塑土制样。在本试验中,在充分考虑埂坎旱季和雨季的土壤平均含水率情况下,试验重塑土含水率设定为5个水平:质量分数为5%(自然质量含水率)、10%、15%、20%和25%(近似饱和),即每个土壤含水率水平下均有3种草本根系土样进行测试,每个水平3个重复,土壤干密度取埂坎0~30 cm土层的平均值 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。当试验用土含水率达到设定值时,将选取好的试验

根和土壤共同放进环刀中,并逐层压实,使重塑复合根—土复合体达到设定的土壤含水率和土壤干密度条件,整个过程避免损坏根系。即在土壤含水率5%~25%内的5个不同梯度条件下,进行稗草、马唐和牛筋草根系的重塑根—土复合体的直剪摩阻和单根拉拔摩阻试验。

1.4 试验仪器与试验方法

1.4.1 直剪摩阻试验 采集的稗草、马唐和牛筋草根系样本直径(diameter, D)均小于1.0 mm,将每个草本的代表根系按 $0\text{ mm}<D\leq 0.5\text{ mm}$ (径级Ⅰ)和 $0.5\text{ mm}<D\leq 1.0\text{ mm}$ (径级Ⅱ)分为两个径级。参考野外采集原状根—土复合体的土壤含根量情况,为保证根系面积比率相近,选取径级Ⅰ的根系6根,径级Ⅱ的根系3根作为直剪摩阻试验的重塑根—土复合体根系材料。

本研究剪切试验采用南京智龙有限公司生产的全自动四联剪直剪仪(LT1008,中国南京)完成。试验剪切速率设为 $0.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,土壤含水率为5%,10%,15%,20%和25%,垂直荷载为25,50,75,100和150 kPa,每组4个重复。利用记录的剪切参数根据库伦—莫尔理论计算5个不同垂直荷载下重塑根—土界面黏聚力和内摩擦角。

1.4.2 单根拉拔摩阻试验 使用LDS-5A电子万能拉力机(LT1008,中国南京),测量精度高达95%。在进行拉拔试验前,选取稗草、马唐和牛筋草根系的单根根系长 $\geq 8\text{ cm}$ 作为代表根系(根系直径选取径级Ⅰ和径级Ⅱ两个等级),用内径为6.1 cm,高为2 cm的自制容器中部对称开一个直径为0.2 cm的圆孔,分2次添加需要测定的试验重塑土(土壤含水率为5%、10%、15%、20%和25%),第一次添加重塑土略高于圆孔1/2直径处时,将根系穿过圆孔直至从夹口端露出,继续添加重塑土直至将整个容器填满,并且控制添加的重塑土土壤干密度达到 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,最后加盖压实^[23]。为避免根系与容器圆孔边缘摩擦造成试验误差,需确保试验根系始终处于圆孔中央。将制好的根—土复合体试样用夹具固定在万能拉力机上,设置加载速度为 $10\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,匀速竖直向上拉拔根系直至其完全从土中拔出。整个拉拔过程可通过软件记录最大抗拔力,每种根系重复3次。即在土壤含水率5%~25%范围内的5个不同梯度条件下,进行稗草、马唐和牛筋草根系的单根拉拔摩阻试验。

1.5 数据分析

采用EXCEL和SPSS 18.0软件进行数据分析和相关图制作。

2 结果与分析

2.1 草本根—土界面抗剪强度与垂直荷载

在试验土壤含水率范围(5%~25%)内,3种草本根—土界面抗剪强度与垂直荷载的关系服从土力学经典理论的莫尔—库伦准则^[24-25]。草本植物根—土界面的抗剪强度随着垂直荷载的增大呈线性增大,两者之间呈显著正相关线性关系($R^2>0.598$)(图2)。通过对不同土壤含水率条件下的草本根—土界面抗剪强度与垂直荷载之间的线性模型进行协方差(ANCOVA)分析可知,3种草本根—土界面抗剪强度表现出极显著差异性($F=10.539, P=0.002<0.01$),根—土界面抗剪强度的边际均值(margin mean)大小为:牛筋草>马唐>稗草。同时, R^2 和纳什系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)均高于0.835。

2.2 紫色土埂坎草本根—土界面摩阻特性

2.2.1 直剪摩阻特性 在5%、15%和20%这3个土壤含水率条件下,稗草根—土界面黏聚力 $[(1.83\pm 0.32)\sim(17.80\pm 3.21)\text{ kPa}]$ 均高于马唐 $[(0.51\pm 0.01)\sim(10.12\pm 1.89)\text{ kPa}]$ 和牛筋草 $[(0.33\pm 0.04)\sim(1.65\pm 0.28)\text{ kPa}]$ (表2)。当土壤含水率为10%时,马唐根—土界面黏聚力却高于稗草和牛筋草,其根—土界面平均黏聚力分别为稗草和牛筋草的1.20和12.63倍。

在不同土壤含水率条件下,马唐、稗草和牛筋草根—土界面摩擦系数分别为 $(0.58\pm 0.14)\sim(0.89\pm 0.15)$ 、 $(0.38\pm 0.04)\sim(0.96\pm 0.13)$ 和 $(0.62\pm 0.08)\sim(1.23\pm 0.41)$,牛筋草根—土界面平均摩擦系数分别比马唐和稗草大27.35%和25.88%。此外,3种典型草本根—土界面摩擦系数均随着土壤含水率增大而波动减小。土壤含水率大小决定了它对草本根—土界面摩擦系数的影响范围,其中高土壤含水率(20%~25%)对这3种草本根—土界面影响较大(表2)。

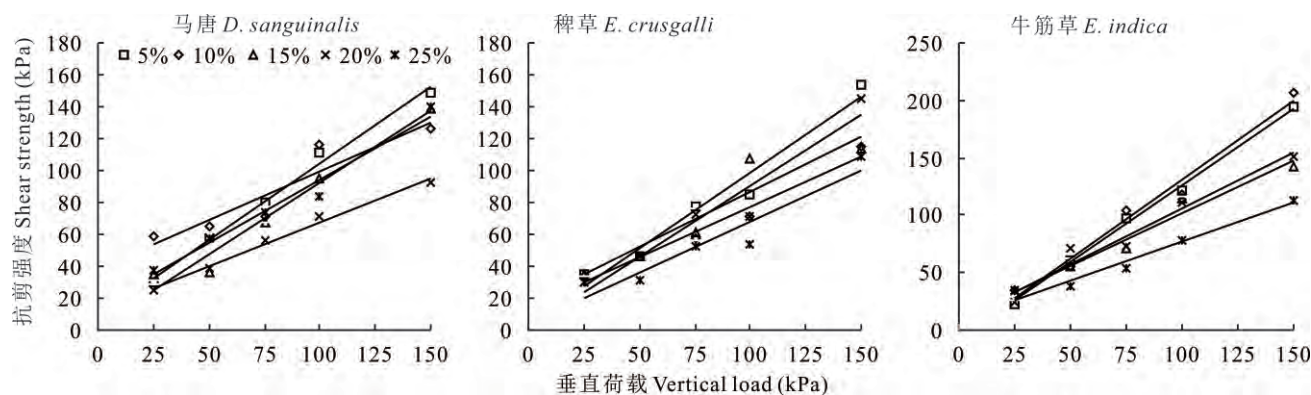


图2 3种草本根-土界面抗剪强度与垂直荷载关系

Fig. 2 Relationship between shear strength and vertical load for 3 kinds of herbs

表2 埂坎3种草本根-土界面摩阻特性

Table 2 Root-soil interface friction characteristics of 3 typical herbs in soil bunds

土壤含水率 Soil water content	根-土界面 Root-soil interface	黏聚力 Cohesive force (kPa)	摩擦系数 Friction coefficient	最大抗拔力 Maximum pulling force (N)	抗拔强度 Pull strength (MPa)
5%	马唐 <i>D. sanguinalis</i>	1.00±0.27b	0.87±0.08a	1.03±0.26b	138.76±43.39c
	稗草 <i>E. crusgalli</i>	11.71±0.20a	0.76±0.09b	1.36±0.35b	165.35±41.69b
	牛筋草 <i>E. indica</i>	0.33±0.04c	1.13±0.11a	3.23±0.95a	244.82±75.45a
10%	马唐 <i>D. sanguinalis</i>	23.11±0.45a	0.88±0.28a	1.33±0.19b	200.66±36.90b
	稗草 <i>E. crusgalli</i>	19.31±0.37b	0.51±0.17b	1.53±0.36b	224.18±41.23a
	牛筋草 <i>E. indica</i>	1.83±0.03c	1.23±0.41a	2.20±0.69a	220.82±53.79a
15%	马唐 <i>D. sanguinalis</i>	0.51±0.01b	0.89±0.15a	2.10±0.35b	302.03±23.47b
	稗草 <i>E. crusgalli</i>	1.83±0.32a	0.96±0.13a	1.86±0.32b	326.76±48.68a
	牛筋草 <i>E. indica</i>	1.65±0.28a	1.07±0.21a	2.95±1.13a	382.12±13.98a
20%	马唐 <i>D. sanguinalis</i>	10.12±1.89b	0.58±0.14b	2.73±0.97a	319.91±37.62a
	稗草 <i>E. crusgalli</i>	17.80±3.21a	0.61±0.16b	2.37±0.26b	303.44±23.81a
	牛筋草 <i>E. indica</i>	1.12±0.20c	1.09±0.21a	2.40±0.21b	332.25±39.21a
25%	马唐 <i>D. sanguinalis</i>	15.10±2.95a	0.59±0.06a	2.31±0.75a	317.36±24.21a
	稗草 <i>E. crusgalli</i>	16.65±1.75a	0.38±0.04b	1.47±0.09b	217.65±10.05b
	牛筋草 <i>E. indica</i>	1.16±1.23b	0.62±0.08a	1.40±0.13b	228.06±15.60b

注: 同列小写字母表示在相同土壤含水率条件下3种草本植物根-土界面存在显著差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters of the same column indicate the significant difference among the three herbs ($P<0.05$).

2.2.2 拉拔摩阻特性 在土壤含水率为5%~15%时,牛筋草根-土界面的平均最大抗拔力分别是马唐和稗草根-土界面的2.06和1.79倍(表2),表明当土壤含水率较低时,牛筋草根-土界面最大抗拔力最大。但在土壤含水率为20%~25%时,马唐根-土界面的最大抗拔力显著高于牛筋草和稗草($P<0.05$),而牛筋草和稗草根-土界面的最大抗拔力无显著差异($P>0.05$)。表明土壤含水率较高时,马唐根-土界面的抗拔性能较好。

当土壤含水率从5%增加到20%时,牛筋草根-土界面抗拔强度均高于马唐,两者之间呈显著差异($P<0.05$),分别增加了76.43%、10.05%、26.52%和3.86%;而当土壤含水率为25%时,根-土界面抗拔强度表现为马唐>牛筋草。表明在土壤含水率较高时,马唐根-土界面抗拔强度要优于牛筋草。此外,3种草本根-土界面在5个土壤含水率下的平均抗拔强度表现为:牛筋草[(281.61±71.73) MPa]>马唐[(255.74±81.82) MPa]>稗草[(247.48±66.32) MPa],且马唐和稗草根-土界面抗拔强度无显著差异($P>0.05$)。由此可知,牛筋草根-土界面的土壤结构稳定性和抗拔性能总体上优于马唐和稗草。

2.3 土壤含水率对草本根—土界面摩阻特性指标的影响

2.3.1 土壤含水率对直剪摩阻特性的影响 研究区内 3 种草本植物根—土界面黏聚力均表现出随着土壤含水率(土壤含水率范围为 5%~25%)的增加呈先减小后增大的变化规律。通过线性拟合可知草本根—土界面黏聚力与土壤含水率之间符合二次多项式函数关系(表 3)。由根—土界面黏聚力与土壤含水率之间的决定系数计算结果可知,牛筋草根—土界面的黏聚力与土壤含水率之间的决定系数(R^2)为 0.629,高于马唐和稗草。表明牛筋草根—土界面的黏聚力与土壤含水率相关性程度较大($P<0.05$)。

表 3 埂坎 3 种草本根—土界面摩阻特性指标与土壤含水率关系

Table 3 Relationships between root-soil interface friction characteristics of 3 kinds of herbs and soil water content

根—土界面 Root-soil interface	黏聚力 Cohesive force		摩擦系数 Friction coefficient	
	回归函数 Regression function	R^2	回归函数 Regression function	R^2
马唐 <i>D. sanguinalis</i>	$y=-0.0058x^2+0.4789x+4.3820$	0.064	$y=-0.0009x^2+0.0095x+0.8672$	0.774
稗草 <i>E. crusgalli</i>	$y=0.0456x^2-1.1991x+18.9100$	0.125	$y=-0.0021x^2+0.0491x+0.4748$	0.417
牛筋草 <i>E. indica</i>	$y=-0.0094x^2+0.3000x-0.7110$	0.629	$y=-0.0028x^2+0.0594x+0.8930$	0.901
根—土界面 Root-soil interface	最大抗拔力 Maximum pulling force		抗拔强度 Pull strength	
	回归函数 Regression function	R^2	回归函数 Regression function	R^2
马唐 <i>D. sanguinalis</i>	$y=0.378x^{0.605}$	0.893	$y=-0.6068x^2+27.7340x+6.6117$	0.968
稗草 <i>E. crusgalli</i>	$y=0.189x^2-0.006x+0.423$	0.598	$y=-1.0387x^2+31.7280x+83.5000$	0.491
牛筋草 <i>E. indica</i>	$y=0.037x^2-0.004x+2.854$	0.640	$y=-1.2090x^2+40.9380x-26.2970$	0.876

随着土壤含水率的增加,3 种草本植物根—土界面摩擦系数均呈先增加后减小的变化趋势,且牛筋草根—土界面的摩擦系数高于马唐和稗草(表 2)。根据相关性分析结果可知,除稗草根—土界面的摩擦系数与土壤含水率无显著相关关系,马唐和牛筋草根—土界面摩擦系数与土壤含水率可用二次多项式函数较好拟合且呈显著负相关($R^2\geq 0.774, P<0.05$)。综上可知,当土壤含水率较大时,草本根—土界面的摩擦系数急剧减小。

2.3.2 土壤含水率对拉拔摩阻特性的影响 分别对试验区内 3 种典型草本植物根—土界面的拉拔摩阻特性(最大抗拔力和抗拔强度)与土壤含水率进行回归分析(表 3)。马唐根—土界面最大抗拔力与土壤含水率可用幂函数较好拟合($R^2=0.893$)且呈显著正相关($P<0.05$),最大抗拔力随着土壤含水率的增大而增大;稗草根—土界面最大抗拔力与土壤含水率可用二次多项式函数较好拟合($R^2=0.598$)且呈正相关;牛筋草根—土界面最大抗拔力与土壤含水率可用二次多项式函数较好拟合($R^2=0.640$)且呈正相关。

埂坎上典型的 3 种草本植物根—土界面抗拔强度与土壤含水率符合二次多项式函数关系(表 3),即均表现为随着土壤含水率的增加呈先增大后减小的趋势。其中,稗草和牛筋草根—土界面抗拔强度均在土壤含水率为 15%~20% 达到最大值。此外,马唐根—土界面抗拔强度与土壤含水率呈显著正相关($P<0.05$)。

综上,虽然埂坎上 3 种草本根—土界面抗拔摩阻特性与土壤含水率之间关系的回归分析曲线各有不同,但由表 2 可知,埂坎上 3 种草本根—土界面抗拔强度仍表现出随着土壤含水率的增加呈先增大后减小的变化规律。

2.4 紫色土埂坎草本根—土界面抗拔力与根系滑动位移

3 种草本根—土界面的抗拔力随滑动位移变化趋势相似(图 3)。在根系拉拔初期,即马唐、稗草和牛筋草根—土界面抗拔力分别为 0~3.3 N、0~2.6 N 和 0~1.4 N,根—土界面抗拔力呈线性增长,其增长幅度比根系滑动位移增长幅度大。随着根系进一步被拔出,根—土界面抗拔力随滑动位移的增大呈波动增加的变化趋势,直至抗拔力达到最大值,其中马唐、稗草和牛筋草根—土界面平均最大抗拔力分别为 1.82、1.66 和 1.46 N。3 种草本植物根—土界面达到最大抗拔力后并未迅速下降,而是在一定滑动位移区间内保持恒定,其中马唐、稗草和牛筋草根—土界面最大抗拔力平均分别在根系滑动位移为 2.86~18.01 mm、4.79~46.98 mm 和 1.88~28.64 mm 区间内保持恒定。根—土界面在一定滑动位移区间内保持最大抗拔力后,出现波动减小并趋于稳定,直至拉拔摩阻

试验结束。3种草本根—土界面抗拔力平均分别下降至0.4、1.3和0.2 N。

在不同土壤含水率梯度下,稗草根—土界面与滑动位移关系曲线差异性较大,这主要是因为稗草根—土界面间的相互作用力在极低和极高土壤含水率时有所变化。具体表现在,稗草根—土界面在土壤含水率为5%和25%时,抗拔力随着滑动位移的增加呈波动增大并趋于稳定,这与整体草本根—土界面与滑动位移关系曲线表现的变化趋势略有不同。

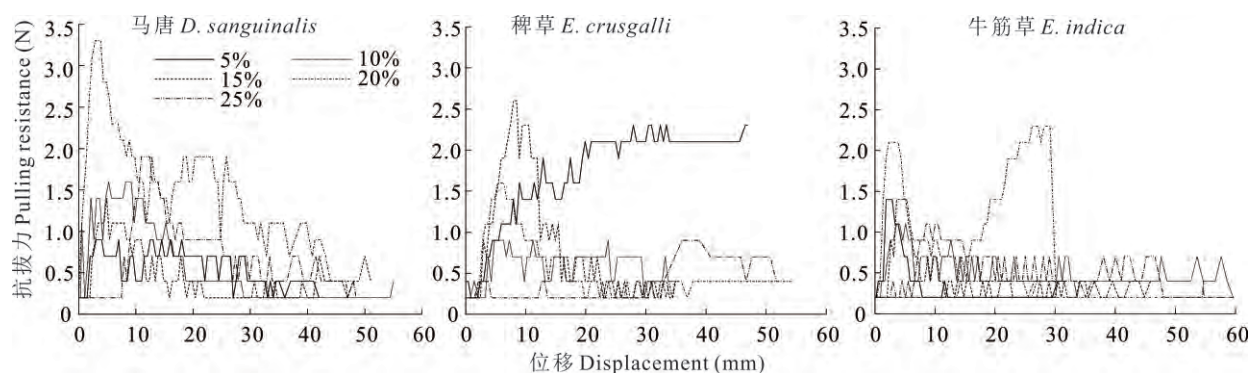


图3 3种草本根—土界面抗拔力与根系位移关系

Fig. 3 Relationship between pulling resistance and displacement for 3 kinds of herbs

3 讨论

3.1 土壤含水率对根系拉拔摩阻力学特征的影响

土壤含水率不仅影响根系在土壤中的生长状况,还决定了草本植物根—土界面的摩阻特性^[21-28]。随着含水率的增加,草本植物根—土界面的黏聚力、摩擦系数、最大抗拔力和抗拔强度整体上呈先增大后减小的趋势。这主要是因为当土壤含水率较小时,土壤颗粒之间不仅间隙较大且两者之间的结合键较弱,同时,根系与土壤颗粒之间接触松散,根—土界面之间联结和黏聚力较弱,导致根系与土壤之间的摩擦系数和抗拔力也较小。土壤颗粒与水之间随着增加的含水率逐渐形成结合水膜,增大根系与土壤颗粒之间的咬合能力,使得根—土界面间的黏聚力和抗拔力也随之增大。当土壤含水率增加到一定程度后(15%左右),土壤颗粒周围的结合水膜的厚度变大,土壤颗粒之间的间距增加,而根系与土壤颗粒接触的面积减少,导致土体对根系的咬合作用随之减小。此外,土壤水在根—土界面还起到一个润滑作用,从而降低了根—土界面的黏聚力和抗拔力。

不同草本植物根—土界面的土壤含水率、空间排列和组织结构均存在差异,导致根—土界面抗拔力与根系滑动位移也有所不同^[13,26]。本研究表明,除了稗草在土壤含水率为5%时抗拔力与滑动位移的变化趋势不同以外,其余两种草本根—土界面抗拔力与滑动位移变化趋势均表现为抗拔力在抗拔初期迅速波动增加并达到最大值,最后波动减小并趋于稳定。该研究结果与邢会文^[26]的研究一致,这是因为根系拉拔初期,根系表面较为粗糙,能与土壤颗粒紧密结合,根系滑动位移受根系本身因受力而拉伸,根—土界面间静摩擦力随着根系滑动位移的增大而增大直至达到最大静摩擦力。之后随着拉拔试验的继续,根—土界面土壤颗粒重新排列并逐步趋于平滑,同时,根—土界面间静摩擦力转为滑动摩擦力,使两者之间的连接结构被破坏,根系与土壤界面接触面积随之减小,导致根—土界面间的摩擦力和抗拔力急剧减小并趋于稳定,直至根系被拔出为止。而稗草在低土壤含水率(5%)下表现出相反的趋势,即随着滑动位移的增大其抗拔力逐渐增大并趋于平稳,这有可能是因为稗草的根系结构较为复杂,在极低含水率梯度下,根—土界面之间的静摩擦力较大,在试验设定的滑动位移条件下,依然能够保持较大的静摩擦力。此外,根—土界面的摩擦力是根系固土护埂功能的关键,只有当根—土界面之间摩擦力较大时,根系抗拉作用和固土能力才随之增强,其中根—土界面间的抗拔力和摩擦力在较高土壤含水率(20%~25%)下较大,本研究结果可得出雨季对根系固土的能力有较大影响。

3.2 草本类型对根—土界面摩阻特性的影响

草本根—土界面的摩阻特性主要受草本植物类型、土壤含水率、根系表面糙度、土壤密度等因素的影响^[21,23-24,27-28]。本研究表明,马唐和稗草的根—土界面黏聚力高于牛筋草,且牛筋草根—土界面黏聚力值整体偏低(表2)。由此可知,牛筋草根系表面对土壤吸附力作用较低,牛筋草根—土界面的黏聚力在根系提高土壤抗剪强度时作用不大,这与田佳等^[15]的研究结果类似。但是,牛筋草根—土界面的摩擦系数和抗拔摩阻特性均高于马唐和稗草。这可能是因为根系表面凹凸度越大,其与土壤颗粒接触面积就越大,从而根—土界面间的摩擦系数增大。由此可得出牛筋草根系凹凸度相对较大是其根—土界面摩擦系数高于1且大于其他两种草本根—土界面的原因之一,但还需要进一步进行验证。

此外,马唐、稗草和牛筋草根—土界面的抗剪强度和垂直荷载的关系均服从土力学经典理论的莫尔—库伦准则(Mohr-Coulomb),这一研究结果也得到了不少研究学者的证实^[27-28]。这表明随着垂直荷载的增大,土壤颗粒间的间距受到挤压而减小,草本根系与土体之间接触更加紧密,则根—土界面间的摩擦阻力和抗剪强度也随之增大,此时根系固土效果增加。其中,在相同的垂直荷载条件和土壤含水率条件下,牛筋草根—土界面抗剪强度及抵抗变形能力显著高于马唐和稗草。

综上可知,在埂坎上生存的草本植物中,牛筋草表现出较好的适应性,能够更好地发挥自身的抗拉能力,增大其对土壤的固结能力,从而达到维持埂坎稳定性的效果,建议将牛筋草作为维护紫色土埂坎稳定性的关键草本。还需要说明的是,根—土界面摩阻特性除了与土壤含水率和草本根系类型有关外,还受土壤干密度、根系数量、根系直径以及根系生长期影响^[21,29]。因此在后续研究中,还应针对紫色土埂坎的草本根—土界面的摩阻特性做进一步分析研究,以便加强埂坎稳定性的生态防护工作。

4 结论

1) 在试验土壤含水率条件下,紫色土埂坎3种草本根—土界面直剪摩阻特性与土壤含水率显著相关($P < 0.05$)。随土壤含水率的增加,根—土界面黏聚力均呈先减小后增大的变化趋势,而摩擦系数呈先增加后减小变化趋势,且均符合二次多项式函数关系。其中,当含水率在15%~20%时,根—土界面黏聚力达到最小值,摩擦系数达到最大值。

2) 土壤含水率对草本根—土界面抗拔摩阻特性影响显著($P < 0.05$)。随着土壤含水率的增加,根—土界面最大抗拔力和抗拔强度整体上呈先增大后减小的趋势。根—土界面抗拔力与滑动位移变化趋势基本一致,抗拔力在抗拔试验初期波动增加并迅速达到最大值,然后波动减小并趋于稳定。

3) 草本根—土界面间抗剪强度和垂直荷载的关系服从莫尔—库伦准则。在较高土壤含水率(20%~25%)下,草本根—土界面间抗拔力较大。牛筋草根—土界面平均最大抗拔力和抗拔强度分别是马唐的1.18和1.30倍,稗草的1.14和1.10倍。整体而言,牛筋草根—土界面摩阻强于马唐和稗草。

参考文献 References:

- [1] Du X, Li S C, Peng Y X. Benefit study on the improved slope farmland by alley cropping and stone dike terrace. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2012, 24(3): 26—35.
杜旭,李顺彩,彭业轩. 植物篱与石坎梯田改良坡耕地效益研究. *亚热带水土保持*, 2012, 24(3): 26—35.
- [2] Bao Y H, Cong P J, Feng W, *et al.* Comprehensive management system of soil and water loss in purple soil area of Southwestern China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(3): 143—150.
鲍玉海,丛佩娟,冯伟,等. 西南紫色土区水土流失综合治理技术体系. *水土保持通报*, 2018, 38(3): 143—150.
- [3] Li J J, Wei J, Li J L, *et al.* Experimental study of different layers infiltration of soil bunds on purple-soil sloping farmlands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 69—74.
黎娟娟,韦杰,李进林,等. 紫色土坡耕地土质埂坎分层入渗试验研究. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 69—74.
- [4] Li J L, Wei J, He X B. Stability analysis of different scale soil bunds on purple soil sloping farmlands. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(5): 1—9.

李进林, 韦杰, 贺秀斌. 紫色土坡耕地不同规格土坎稳定性分析. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 1—9.

- [5] Amare T, Zegeye A D, Yitafu B, *et al.* Combined effect of soil bund with biological soil and water conservation measures in the Northwestern Ethiopian highlands. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2014, 14(3): 192—199.
- [6] Jemberu W, Baartman J E M, Fleskens L, *et al.* Assessing the variation in bund structure dimensions and its impact on soil physical properties and hydrology in Koga catchment, highlands of Ethiopia. *Catena*, 2017, 157(10): 195—204.
- [7] Pallegattha M, Indraratna B, Heitor A, *et al.* Shear strength of a vegetated soil incorporating both root reinforcement and suction. *Transportation Geotechnics*, 2019, 18(3): 72—82.
- [8] Nomessi K K, André G T, Zanin K. Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects. *Ecological Engineering*, 2016, 86(1): 146—153.
- [9] 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(2): 196—202.
- [10] Li G R, Hu X S, Mao X Q, *et al.* Numerical simulation of shrub roots for slope protection effects on loess area of Northeast Qinghai—Tibetan Plateau. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 29(9): 1877—1884.
李国荣, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原东北部黄土区灌木根系护坡效应的数值模拟. 岩石力学与工程学报, 2012, 29(9): 1877—1884.
- [11] Wang Y Z, Liu X F, Zhang Z K, *et al.* Experimental research on influence of root content on strength of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(8): 1405—1410.
王元战, 刘旭菲, 张智凯, 等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1405—1410.
- [12] Ye C, Guo Z, Li Z, *et al.* The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China. *Geomorphology*, 2017, 285: 82—93.
- [13] Song W F, Chen L H, Liu X P. Experiment on characteristic of interface between root system and soil. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(2): 62—65.
宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 根系与土体接触面相互作用特性试验. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 62—65.
- [14] Xing H W, Liu J, Wang L H, *et al.* Friction characteristics of soil-soil interface and root-soil interface of *Caragana intermedia* and *Salix psammophila*. *Tribology*, 2010, 30(1): 87—91.
邢会文, 刘静, 王林和, 等. 柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 87—91.
- [15] Tian J, Cao B, Ji J N, *et al.* Direct shear friction test and numerical simulation of soil-soil and root-soil interface of *Hedysarum scoparium* and *Salix psammophila*. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(13): 149—156.
田佳, 曹兵, 及金楠, 等. 花棒沙柳根与土及土与土界面直剪摩擦试验与数值模拟. 农业工程学报, 2015, 31(13): 149—156.
- [16] Liu Y B, Hu X S, Yu D M, *et al.* Distribution characteristics of combined herb and shrub roots in loess area of Xining Basin and their effect on enhancing soil shear strength. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(3): 471—481.
刘亚斌, 胡夏嵩, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区草本和灌木组合根系分布特征及其增强土体抗剪强度效应. 工程地质学报, 2020, 28(3): 471—481.
- [17] Du J H, Hu J, Li G F, *et al.* Friction effects of the interface of rubber tree roots-soil. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2019, 37(1): 68—73.
杜金辉, 胡俊, 李光范, 等. 橡胶树根—土界面摩擦效应试验研究. 海南大学学报(自然科学版), 2019, 37(1): 68—73.
- [18] Fan C C. A displacement-based model for estimating the shear resistance of root-permeated soils. *Plant Soil*, 2012, 355(1/2): 103—119.
- [19] Chen Y, He B H, Lian C X, *et al.* Root-soil system anti-scourability on steep slopes in the Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5173—5181.
湛芸, 何丙辉, 练彩霞, 等. 三峡库区陡坡根—土复合体抗冲性能. 生态学报, 2016, 36(16): 5173—5181.
- [20] Wei J, Shi B L, Li J L. Response of soil shear strength to soil water content in purple soil slope cropland bunds. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(20): 153—160.
韦杰, 史炳林, 李进林. 紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应. 农业工程学报, 2016, 32(20): 153—160.
- [21] Lin D G, Huang B S, Lin S H. 3-D numerical investigations into the shear strength of the soil-root system of Makino bamboo and its effect on slope stability. *Ecological Engineering*, 2010, 36(8): 992—1006.
- [22] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing, GB/T50123-2019. Beijing:

China Planning Publishing House, 2019.

中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准, GB/T50123-2019. 北京: 中国计划出版社, 2019.

- [23] Liu Y B, Yu D M, Fu J T, *et al.* Experimental study on root-soil friction mechanical mechanism of *Caragana korshinskii* Kom in loess area. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 198–205.
- 刘亚斌, 余冬梅, 付江涛, 等. 黄土区灌木柠条锦鸡儿根—土间摩擦力学机制试验研究. 农业工程学报, 2017, 33(10): 198–205.
- [24] Wang R Z, Chen Y, Li T, *et al.* Root distribution characteristics of *Vetiveria zizanioides* and *Digitaria sanguinalis* and their effect on the anti-erodibility of purple soil in slope lands. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(7): 45–54.
- 王润泽, 湛芸, 李铁, 等. 香根草和马唐的根系特征及对坡地紫色土抗侵蚀性的影响. 草业学报, 2017, 26(7): 45–54.
- [25] Huang Z, Wei B, Zhang L, *et al.* Surface crack development rules and shear strength of compacted expansive soil due to dry-wet cycles. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(4): 2647–2657.
- [26] Xing H W. Test studies on the surface friction characteristics of 4 kinds of plant roots. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.
- 邢会文. 4 种植物根—土界面摩阻特性研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [27] Wei J, Shi B L, Li J L, *et al.* Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities. Catena, 2018, 166(3): 124–133.
- [28] Zheng L W, Liu X G, Yu X X, *et al.* Effects of root diameter of *Pinus tabulaeformis* on friction characteristics for root-soil interface. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 26(3): 90–94.
- 郑力文, 刘小光, 余新晓, 等. 油松根系直径对根—土界面摩擦性能的影响. 北京林业大学学报, 2014, 26(3): 90–94.
- [29] Mao Z, Yang M, Bourrier F. Evaluation of root reinforcement models using numerical modeling approaches. Plant and Soil, 2014, 381(1/2): 249–270.