

# 内蒙古中西部 3 种乡土植物根系 抗拉力学特性的对比研究

左志严, 格日乐, 乌仁图雅, 王娟

(内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

**摘要:** [目的] 研究内蒙古中西部地区 3 种乡土植物种根系的抗拉机理, 为该区水土保持的树种选择提供依据。[方法] 以内蒙古中西部地区 3 种常见植物柠条、沙棘和紫花苜蓿根系为对象, 进行室内单根瞬时极限拉伸试验研究。[结果] (1) 3 种植物单根极限抗拉力随着直径的增加而增大, 单根极限抗拉强度随直径的增加均呈幂函数递减。(2) 当直径在 0.19 mm~2.89 mm 范围内相同径级时, 3 种植物单根极限抗拉强度和弹性模量均值大小顺序相同, 依次为: 柠条>沙棘>紫花苜蓿, 3 种植物根径 $\leq 0.5$  mm 的细根具有较大的极限抗拉强度和弹性模量; (3) 同一树种当根系直径相同时, 土壤含水率高则其单根平均极限抗拉强度小。[结论] 根系的力学特性与形态结构特征的结合, 是选择适宜的水土保持树种非常重要的因素。从根系抗拉性能方面评价 3 种植物根系固土抗蚀能力大小则柠条优于沙棘和紫花苜蓿。

**关键词:** 单根; 极限抗拉力; 极限抗拉强度; 弹性模量; 土壤含水率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0052-06

中图分类号: S714.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.011

## Root Tensile Mechanism Comparison of Three Aboriginal Plants in Central-western Inner Mongolia Area

ZUO Zhiyan, Gerile, Wurentuya, WANG Juan

(College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia  
Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

**Abstract:** [Objective] Root tensile mechanism of three aboriginal plants in the Central-western Inner Mongolia area was studied to provide references of species selection for soil and water conservation. [Methods] Single root tension of three common plants of the midwest regions of Inner Mongolia area, *Hippophae rhamnoides*, *Caragana korshinskii* and *Medicago sativa* were tested with indoor instantaneous ultimate method. [Results] (1) Single root transient ultimate tensile strength of the plants increased with diameter; single root ultimate tensile strength decreased by power function with diameter increased; (2) When the root diameters were in the same size class between 0.19~2.89 mm, three species' single root transient ultimate tensile strength and modulus of elasticity ranked as: *Hippophae rhamnoides*>*Caragana Korshinskii*>*Medicago sativa* when the three plants' root diameter were less than 0.5 mm, the fine root had greater ultimate tensile strength and modulus of elasticity; (3) When the same tree species had the same root diameter, if soil had high moisture content, the average tensile strength of single was small. [Conclusion] It is important to consider both morphological characteristics and mechanical properties when choosing appropriate species for soil and water conservation. The levels of root reinforcement erosion resistance of *Caragana korshinskii* were better than that of *Hippophae rhamnoides* and *Medicago sativa*.

**Keywords:** single root; ultimate tensile; ultimate tensile strength; modulus of elasticity; soil moisture content

收稿日期: 2014-02-21

修回日期: 2014-03-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“准格尔露天煤矿排土场水土保持功能植被固土抗蚀生物力学响应机制”(41161046)

第一作者: 左志严(1992—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 496117499@qq.com。

通信作者: 格日乐(1970—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: gerile81@sohu.com。

近年来植物固坡措施在国内外得到广泛应用<sup>[1-6]</sup>。根是植物直接与土壤接触的营养器官,能与土壤颗粒形成根网,将植物体牢牢固定于土壤中,在稳定土壤结构、提高土壤抗蚀性、防止土壤侵蚀方面的作用非常显著,是地上部分所无法替代的<sup>[7]</sup>。植物根系是高分子有机体,根系纤维素分子键使植物在沿根长方向具有一定的抗拉性,在拉应力作用下表现出一定的弹性(或称黏弹性),以适应轴向拉力。在没有林木生长的边坡上土体下滑除了首先克服土壤粒子间的黏结力以外,还必须克服滑动时产生的摩擦力,如果把克服黏结力和摩擦力统一理解为破坏时对土体的剪力,则这时的黏结力和摩擦力即土体的抗剪力。有林地边坡土体滑动时除了克服上述两种力外,还必须克服根系的固持力——根系与土体间的摩擦阻力或根系的抗拉力。坡体滑动时由于根系受拉位移而导致根系表面与土粒之间发生摩擦,这种摩擦产生的摩擦力阻止根系位移并通过根系表面把摩擦阻力传递给树根,如果树根的抗拉力大于根系表面与土体间的摩擦阻力,则根系被滑动体在滑动时从滑动面以下的土体中抽拉出来。如果根系的抗拉力小于这个摩擦阻力,根系便被拉断而不会抽出。植物单根抗拉特性是植物根系生物力学特性的重要组成部分,是研究植物根系固土作用的基础。林木根系的抗拉能力是根系固土的一个重要表征,目前主要从野外原位群根抗拔<sup>[8-13]</sup>和室内单根抗拉<sup>[6,9-10,12,14-24]</sup>两方面来研究根系的抗拉力学特征。野外原位群根抗拔试验证明,整棵树根系抗拔力的大小取决于根系的分布形态和单根的抗拉特性;单根室内抗拉试验研究结果表明,根系抗拉力与直径呈显著的幂函数正相关关系,根系抗拉强度与直径呈显著的负相关关系、与根系的纤维素含量呈正相关关系等。此外,相关研究者<sup>[25-26]</sup>也提出了所研究植物根系的抗拉强度指标。植物单根是根系固土的基本单元,单根的形变决定了植株受外力时的整体应变状态,而且根系结构中处于拉力状态的根提供大约 60% 的阻力去抵抗暴风雨。因此,对单根的一系列研究是根系力学性能研究的起点。鉴于此,本研究以内蒙古自治区中西部 3 种常见植物柠条、沙棘和紫花苜蓿根系为对象,进行室内单根瞬时极限拉伸试验,模拟瞬时大风作用、暴雨顺坡冲刷下单根受拉断裂状态,研究 3 种植物单根极限抗拉力、极限抗拉强度、弹性模量等指标,以及直径、土壤含水率等因素对单根抗拉力学特性的影响,揭示 3 种不同植物根系抗拉力学特性的共同规律和差异,为该区域优良水土保持植物的选择提供基础力学数据。

## 1 研究方案

### 1.1 试验材料

选择在内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔煤田黑岱沟露天煤矿的内排土场平台,于 2012 年 5 月初,选择生长良好的 4 年生柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)样地,样地中心地理位置为 39°47'15"N,111°16'07"E,位于 1 台地,海拔高度为 1 255 m,土壤为复填土。该露天煤矿自然概况、植物样地及标准株的选取、植物生长状况、造林方式等已另文发表<sup>[26]</sup>,这里不再赘述。将选择好的标准株用剖面壁法<sup>[27]</sup>挖出根系,将根系置于与生长环境相似的湿沙中暂时保存,带回实验室在 2~4 °C 的保鲜箱内保存备用。取得的试样尽快测定,以保证根系材料的新鲜。

### 1.2 试验样品制备

研究植物根系生物力学特性如果只针对每种植物的整个地下部分,会出现工作量大,重复性小等问题,因此应首先确定每种植物根系的代表根。代表根的确方法,通过将植株地下部分所有根系以 0.5 mm 为 1 个径级进行分级,分别计算每个径级的累计根数量、累计根长、累计根表面积、累计根干重百分比等 4 个方面进行分析判断,选取根生物量众值所对应的直径组作为该种植物的代表根,3 种植物中柠条和沙棘代表根的文章已另文发表<sup>[28]</sup>。结果表明,柠条代表根径级为 0~0.5 mm,0.5~1 mm,1~1.5 mm;沙棘代表根径级为 0.5~1 mm 和 1~1.5 mm。上述 2 种植物代表根的研究结果显示,细根是植物地下部分发挥固土、抗蚀作用的主体,即细根交错密布,网络固持土壤,提高土壤的抗侵蚀能力。而当大风、暴雨来袭时,最易遭受破坏的也是细根,所以细根是制约整个植株发挥固土抗蚀作用的根本,也是根系生物力学研究的主要部分。因此,对柠条、沙棘和紫花苜蓿 3 种植物根系抗拉生物力学特性的研究针对细根进行,根系直径在 0~3 mm 之间。

将待测植物根系(直径在 0~3 mm 之间)以 0.5 mm 为一个径级进行分级。试验前选取直径变化不大,顺直少弯曲,表皮完好的根段,根段至少长 80 mm,再从中间量取 60 mm,在 60 mm 根段上 4 等分地做 5 处标记,即每隔 15 mm 作一个标记,共做 5 个标记。在试验根一端标记点的外侧贴上编有序号的标签,用游标卡尺从贴标签一侧开始依次量取 5 个标记点处直径,每个点正交方向各测量一次,然后取其平均值作为该点直径。将量好的待测试验根按径级

放入贴有标识的密封袋,并在 24 h 内快速进行试验。

不同土壤含水率下根系拉伸材料的制备:试验按照在样地中实际测定的土壤含水率 10.86% 以及风干含水率 4.5% (模拟土壤干旱) 的 2 个含水率梯度进行制备。土壤含水率 10.86% 的土样制备:试验用土取自排土场植物样地内 3 株标准株附近 1 m 以内,取土深度为 20—100 cm 的根系分布层,以 20 cm 为一层分 4 层取样,每层 3 个重复,根据测定 20—100 cm 土层平均含水率为 10.86±1.02%,容重为 1.53±0.31 g/cm<sup>3</sup>。将植物样地所取土壤在自然状态下风干后,测定风干含水率为 4.5±0.36%,将风干土样在 105 °C 条件下烘干 24 h,称取一定重量的烘干土置于带盖的塑料桶内,然后据实测的试验用土壤含水量 10.86% 计算所需水量,倒入桶内拌匀,将分级测量好直径的试验根放在 10.86% 含水量的土壤中,在阴凉处放置 24 h 后,取出称量根系重量,以后每隔 2 h 测一次根系重量,直到根系重量恒定时,进行拉伸试验。土壤含水率 4.5% 的土样制备:直接取风干含水率为 4.5% 的土样,按照上述方法进行根系拉伸试样的制备。

### 1.3 仪器和方法

试验仪器为 YG(B)026H-250 型织物强力机(精度为 0.01,拉力量程为 0~2 500 N)以及电子游标卡尺(精度 0.01 mm)和直尺等。织物强力机最大加载速度为 500 mm/min。

试验步骤:调整织物强力机标距固定为 60 mm,将根段两端伸入夹具至少 10 mm,拧紧夹具将根段固定,在夹单根时注意置于夹头的中部,使拉伸材料和水平面保持垂直。试验设置为 500 mm/min 的加载速度,单根轴向极限抗拉力可由电脑直接读取。由于根径沿轴向变化,计算单根极限抗拉强度时,根径取断裂处上下 2 个标记点直径的平均值。在试验过程中,会出现根段在夹具两端断裂现象,本试验中认为单根在夹具中间或接近中间处破坏时数据有效,以保证根系的断裂是由于拉力引起的而不是由于其他的任何测试过程中的损伤引起的。极限抗拉强度由公式(1)进行计算<sup>[29]</sup>:

$$P=4 F/\pi D^2 \quad (1)$$

式中: $P$ ——极限抗拉强度(MPa); $F$ ——极限抗拉力(N); $D$ ——根系断裂处直径(mm)。

平均极限抗拉强度( $T_r$ )<sup>[30]</sup>计算公式为:

$$T_r = \sum T_i n_i a_i / \sum n_i a_i \quad (2)$$

式中: $n_i$ ——直径为第  $i$  级的根的数量; $a_i$ ——直径为第  $i$  级的根的平均截面面积(mm<sup>2</sup>); $T_i$ ——直径为第  $i$  级的根的极限抗拉强度(MPa)。极限应变(延

伸率)由公式(3)计算<sup>[30]</sup>:

$$\epsilon = \Delta L / L \quad (3)$$

式中: $\epsilon$ ——极限应变; $\Delta L$ ——试验根拉伸过程中的伸长量(mm); $L$ ——试验根初始长度(mm)。

弹性模量计算公式为<sup>[31]</sup>:

$$E = \sigma / \epsilon \quad (4)$$

式中: $\sigma$ ——应力(MPa), $\sigma = F/A$ ;  $F$ ——拉力(N); $A$ ——根段截面积(mm<sup>2</sup>); $\epsilon$ ——极限应变即极限延伸率, $\epsilon = \Delta L/L$ ;  $E$ ——弹性模量。

## 2 结果与分析

### 2.1 单根极限抗拉力、极限抗拉强度与直径关系

3 种植物根系直径在 0~3 mm 范围时,单根极限抗拉力随着直径的增加而增大,通过 SAS 9.0 软件进行回归分析,3 种植物单根极限抗拉力与根径均在  $\alpha=0.01$  的水平下呈显著的正相关关系,柠条( $R^2=0.873$ )、沙棘( $R^2=0.861$ )和紫花苜蓿( $R^2=0.797$ )均以幂函数递增。柠条根系的直径范围是 0.09~3.06 mm,沙棘根系的直径范围是 0.17~2.89 mm,紫花苜蓿根系的直径范围是 0.19~3.05 mm,故在直径 0.19~2.89 mm 范围内相同径级时,3 种植物单根极限抗拉力均值从大到小依次为:柠条(96.63 N)>沙棘(47.35 N)>紫花苜蓿(29.33 N)。对柠条和沙棘 2 种植物代表根研究<sup>[27]</sup>中发现,代表根交集为 0.5~1.5 mm。综合考虑 2 种植物代表根径级分布和 3 种植物在相同直径下对比两个方面,当直径在 0.5~1.5 mm 时,3 种植物单根极限抗拉力均值从大到小依次为:柠条(58.04 N)>沙棘(21.15 N)>紫花苜蓿(9.82 N),柠条单根极限抗拉力是沙棘的 2.74 倍和紫花苜蓿的 5.9 倍;单根极限抗拉强度随直径的增大而减小,3 种植物均以幂函数递减,回归方程的相关系数均大于 0.65,大于置信水平为 0.01 时的最小相关系数。同样当直径在 0.19~2.89 mm 范围内相同径级时,3 种植物单根极限抗拉强度均值从大到小依次为:柠条(104.26 MPa)>沙棘(29.28 MPa)>紫花苜蓿(25.45 MPa)。当直径在 0.5~1.5 mm 范围时,3 种植物单根极限抗拉强度均值从大到小依次为:柠条(110.95 MPa)>沙棘(32.46 MPa)>紫花苜蓿(28.65 MPa),柠条单根极限抗拉强度是沙棘的 3.42 倍和紫花苜蓿的 3.87 倍。产生这一差异的原因可能取决于根系的内部结构的不同,柠条根系的结构较为致密,具有发达的次生韧皮部和次生木质部,纤维素和木质素含量多,因此具有较大的抗拉力;沙棘根系内部细胞含水量大,细胞间隙较大,在拉伸过程中细胞受力容易滑脱,表现出

较脆的特点,所以抗拉力较小,而紫花苜蓿为草本植物,根系组织的木质化程度较灌木低的缘故,关于这方面需要进一步进行研究。图 1 为 3 种植物单根平均极限抗拉强度与直径关系图。由图 1 可以看出,3 种植物平均极限抗拉强度亦随着径级的增加呈减小的趋势。在所测试的根系中,直径 $\leq 0.5$  mm 的细根具有较大的极限抗拉强度,其中柠条平均直径为 0.21 mm 时的极限抗拉强度均值为 254.67 MPa,沙棘平均直径 0.24 mm 时为 120.86 MPa,紫花苜蓿平均直径是 0.32 mm 时为 84.35 MPa,分别为直径在 0.5~1.5 mm 范围平均极限抗拉强度的 2.30,3.72 和 2.94 倍,相当于 I 级钢筋极限抗拉强度(370 MPa)的 69%,33%和 23%,这与其他研究者<sup>[24,30-31]</sup>对不同植物种根系抗拉力学特征研究证明植物的细根、毛根具有强大的抗拉能力的结论相同。同时已有的研究<sup>[32]</sup>表明,直径 $\leq 1$  mm 的毛根对缠绕固结土壤,强化土壤抗冲性有巨大作用。因此根系的力学特性与形态结构特征的结合,是选择适宜的水土保持树种非常重要的因素。

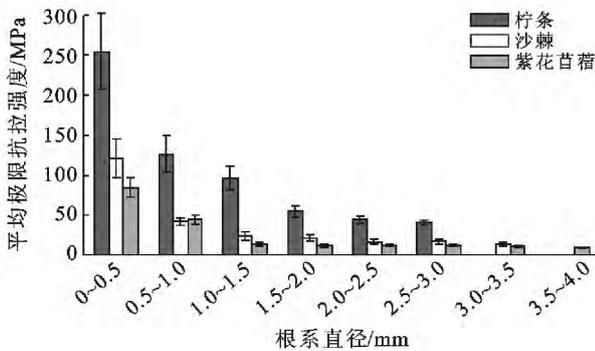


图 1 根系极限抗拉强度均值与直径关系

### 2.2 单根极限应变、弹性模量与直径关系

植被根系对斜坡的稳定和加固作用,其重要基础之一是根系具有较强抗拉特性和变形能力,极限应变是指根系在单向拉伸下断裂前所达到的最大延伸率,包括弹性应变和塑性应变,是衡量根系拉断之前总的变形能力。通过 SAS 9.0 软件进行回归分析,3 种植物中沙棘单根极限应变与根径在  $\alpha=0.01$  的水平下呈显著正相关关系,柠条和紫花苜蓿回归方程的复相关系数小于 0.5,小于置信水平为 0.01 时的最小相关系数。3 种植物中沙棘单根极限应变(延伸率)与直径呈显著的正相关,柠条和紫花苜蓿则关系不显著。柠条和紫花苜蓿 2 种植物间相比较,紫花苜蓿根极限应变与根径在  $\alpha=0.1$  的水平下呈显著正相关关系,柠条回归方程的相关系数小于 0.5,小于置信水平为 0.1 时的最小相关系数。根据上述结果对沙棘

和紫花苜蓿 2 种植物单根极限延伸率与直径进行进一步回归分析,沙棘单根极限延伸率随直径的增加以幂函数递增( $R^2=0.617$ ),紫花苜蓿则以多项式函数递增( $R^2=0.335$ )。究其原因可能与植物种不同,其生物学特性不同,则生物力学特性也不同,关于这点需要结合植物微观组织的形态解剖构造及化学组分等进行进一步研究。图 2 为 3 种植物单根在不同径级下极限延伸率均值变化图,通过 SAS 9.0 软件进行差异性检验,3 种植物单根极限延伸率均值在  $\alpha=0.01$  的水平下具有显著的差异性。从图 2 可以看出,3 种植物极限延伸率均值随径级变化基本表现为 2 种类型:(1)递增型。如紫花苜蓿,极限延伸率均值随着径级的增加而增加;(2)单峰曲线型。如柠条和沙棘,单根极限延伸率均值开始随径级的增加而增加,达到最大值后,随着径级的继续增加呈下降趋势。从图 2 还可以看出,2 种灌木柠条和沙棘随着径级的增加,极限延伸率均值曲线波动明显,而草本植物紫花苜蓿则曲线变化较均匀,这可能与植物的生物学特性有关,关于这点还需要结合植物组织微观结构、化学组分等方面进一步研究。当直径在 0.19~2.89 mm 范围相同径级时,3 种植物单根极限延伸率均值从大到小依次为:沙棘(8.88%)>柠条(8.71%)>紫花苜蓿(4.73%),沙棘稍大于柠条,但二者差值很小不明显。当直径在 0.5~1.5 mm 范围时 3 种植物单根极限延伸率均值从大到小依次为:柠条(8.23%)>沙棘(6.4%)>紫花苜蓿(3.97%),柠条单根极限延伸率是沙棘的 1.29 倍和紫花苜蓿的 3.07 倍。

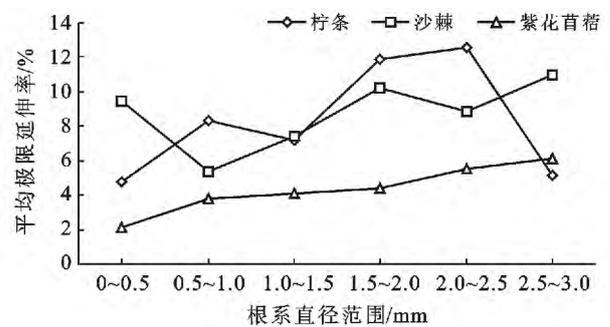


图 2 根系极限延伸率均值与直径关系

图 3 为 3 种植物单根在不同径级下极限弹性模量均值变化图,通过 SAS 9.0 软件进行差异性检验,3 种植物单根极限弹性模量均值在  $\alpha=0.01$  的水平下具有显著的差异性。从图 3 可以看出,同一树种极限弹性模量的均值随着径级的增加呈下降的趋势,这与 3 种植物单根极限抗拉强度均值随径级变化的趋势相同,当直径在 0.19~2.89 mm 范围相同径级时,

3种植物单根极限弹性模量均值从大到小依次为:柠条(2126.4MPa) > 沙棘(952.29MPa) > 紫花苜蓿(435.44MPa)。当直径在0.5~1.5 mm范围时3种植物单根极限弹性模量均值从大到小依次为:柠条(1765MPa) > 沙棘(890.55MPa) > 紫花苜蓿(772.67MPa),柠条单根极限弹性模量是沙棘的1.98倍和紫花苜蓿的2.28倍。从图3还可以看出,直径 $\leq 0.5$  mm的细根具有较大的极限弹性模量,3种植物间相比较,柠条单根平均直径为0.21 mm时极限弹性模量的均值为7178.01 MPa > 沙棘单根平均直径为0.24 mm时的极限弹性模量均值6430.21 MPa > 紫花苜蓿单根直径0.32 mm时的极限弹性模量的均值1482.19 MPa,分别为各自单根直径在0.5~1.5 mm径级范围极限弹性模量均值的4.07倍(柠条)、7.22倍(沙棘)和1.92倍(紫花苜蓿)。说明同样的外界加载条件,直径较小的根系对外界拉力的缓冲能力比直径大的根系缓冲能力大,结合3种植物单根极限抗拉强度与直径关系的研究结果可以看出,即直径较小的根系具有较强的极限抗拉强度,这可能是细根增强土壤抗蚀抗冲性的机理所在。

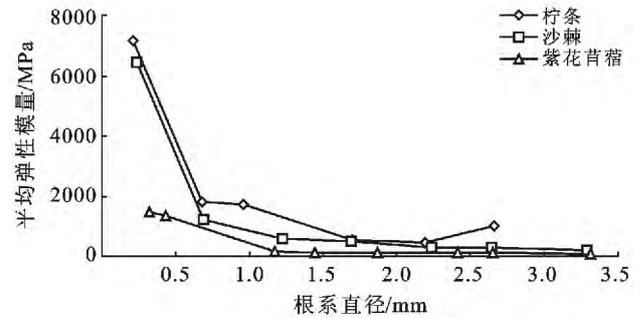
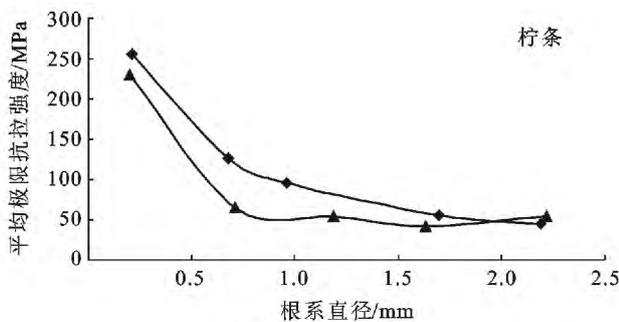


图3 根系极限弹性模量均值与直径关系

### 2.3 土壤含水率对单根极限抗拉强度的影响

图4为2种灌木根系在2种不同土壤含水率下单根平均极限抗拉强度随直径变化曲线。通过SAS9.0软件进行差异性检验,2种植物在2种不同土壤含水率下极限抗拉强度在 $\alpha=0.01$ 的水平下具有显著的差异性。从图4可以看出,当直径相同时,2种灌木总体表现为,土壤含水量大则其单根平均极限抗拉强度小的变化特点。其中柠条在2~2.5 mm时稍有波动。表明2种灌木根系在土体含水量较低的情况下根系固土能力要优于高含水量土体。这与苑淑娟<sup>[33]</sup>和张永亮<sup>[34]</sup>等的研究结论一致。

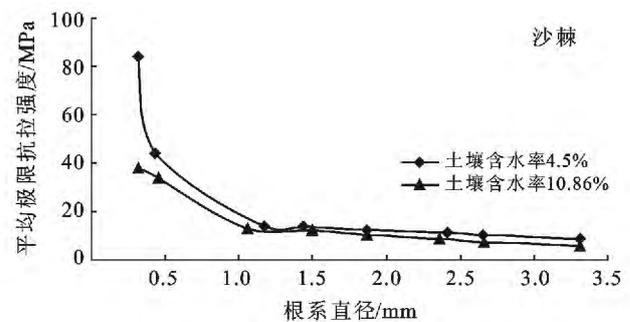


图4 土壤含水率对根系极限抗拉强度的影响

## 3 结果讨论

单根极限抗拉力随着根径的增大而增大,极限抗拉强度通常随着根系尺寸的增大而减少,但不同树种变化的函数不同。本研究中柠条、沙棘和紫花苜蓿单根极限抗拉力随着直径的增加均以幂函数增大,这与灌木四翅滨藜、柠条锦鸡儿、铁仔、羊蹄甲、黄荆、沙地柏、沙柳等根系变化函数一致<sup>[12,17,23]</sup>,与灌木霸王、白刺等根系极限抗拉力随直径增大以指数函数增大的结论不同<sup>[12,22-23]</sup>。根系极限抗拉强度随着直径增大以幂函数递减,这与灌木四翅滨藜、柠条锦鸡儿<sup>[23]</sup>、针叶树挪威云杉、南欧海松和南欧黑松和阔叶树种欧洲山毛榉、欧洲板栗<sup>[11]</sup>、草本紫花苜蓿和马唐等根系极限抗拉强度与直径的关系一致<sup>[31]</sup>。单根抗拉力随着

根茎的增大而增大,极限抗拉强度通常随着根系尺寸的增大而减少,这种规律已经被很多文献证实<sup>[29,31,33-34]</sup>,但是究其机理目前还不太清楚。而且不同树种根系随直径的变化函数类型不同,这种差异与根系微观结构有关,还是受树种的遗传基因所决定;另一面植物根系是生物材料,其结构具有各向异性及不均匀性的特点,且在其生长过程中受外界因素影响,根系内部结构会发生变化,这方面的因素还有待于进一步研究。

## 4 结论

(1) 当根系直径在0~3 mm范围时,3种植物单根极限抗拉强度随直径的增大均以幂函数递减。3种植物在0.19~2.89 mm范围内相同径级时,单根

极限抗拉力和抗拉强度从大到小顺序相同,表现为:柠条>沙棘>紫花苜蓿。表明从固土抗蚀的根系生物力学特性方面来看,3种植物间相比较,柠条明显优于沙棘和紫花苜蓿。产生这一差异的原因可能取决于根系的内部结构的不同。关于这方面还需要结合根系微观解剖结构及化学组分进行进一步研究。

(2) 3种植物在各自研究径级范围内,沙棘单根极限应变(延伸率)随直径的增加以幂函数递增,紫花苜蓿则以多项式函数递增,柠条单根极限应变与直径关系不显著。当直径在0.19~2.89 mm范围内相同径级时3种植物单根极限应变均值从大到小依次为:沙棘(8.88%)>柠条(8.71%)>紫花苜蓿(4.73%),柠条和沙棘单根极限应变差值很小为0.17%。当直径在0.5~1.5 mm柠条和沙棘代表根所在径级范围时,柠条单根极限应变(延伸率)是沙棘的1.29倍和紫花苜蓿的3.07倍。

(3) 3种植物在各自研究径级范围内,单根极限弹性模量的均值随着径级的增加呈下降的趋势。当直径在0.19~2.89 mm范围相同径级时,3种植物单根极限弹性模量均值从大到小依次为:柠条(2 126.4 MPa)>沙棘(952.29 MPa)>紫花苜蓿(435.44 MPa)。在所研究的根系中,柠条、沙棘和紫花苜蓿直径 $\leq 0.5$  mm的细根具有较大的极限弹性模量,说明同样的外界加载条件,直径较小的根系对外界拉力的缓冲能力比直径大的根系缓冲能力大,直径较小的根系又具有较强的极限抗拉强度,这也正是细根增强土壤抗蚀、抗冲性的机理所在。因此,根系的力学特性与形态结构特征的结合,是选择适宜的水土保持树种非常重要的因素。弹性模量和极限应变(延伸率)反映的是根系在拉伸过程中的变形能力,而且受很多因素的影响,其中直径和树种是很重要的因素。

(4) 同一树种,当根系直径相同时,土壤含水量大则其单根平均极限抗拉强度小,表明柠条和沙棘根系在土体含水量较低的情况下根系固土能力要优于高含水量土体。这也从另外一个角度证明树木可以通过蒸腾作用降低土壤含水量,提高根系固持土体的能力。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] Coppin N J, Richares I G. Use of Vegetation in Civil Engineering[M]. London: Butterworths, 1990.  
 [2] Gray D H. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.  
 [3] Norris J E. Root reinforcement by Hawthorn and Oak roots on a highway cut-slope in Southern England[J].

Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 43-53.  
 [4] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy)[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 11-22.  
 [5] 熊燕梅,夏汉平,李志安,等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J]. 应用生态学报,2007,18(4): 895-904.  
 [6] 杨永红,刘淑珍,王成华,等. 浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究[J]. 水土保持研究,2007,14(1): 138-140.  
 [7] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):34-37.  
 [8] 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究[J]. 水土保持学报,1990,4(3):7-14.  
 [9] 朱清科,陈丽华. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(4):64-67.  
 [10] 张东升. 长江上游暗针叶林林木根系抗拉力学特性研究[D]. 北京:北京林业大学,2002.  
 [11] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and Soil, 2005,278(1/2):1-9.  
 [12] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10):2051-2057.  
 [13] Docker B B, Hubble T C T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species[J]. Geomorphology, 2008,100(3):401-418.  
 [14] 阿部和时,岩元贤. 用树木根系的抗拉强度测定根系固定坡面的作用[J]. 水土保持科技情报,1992(4):53-57.  
 [15] 杨维西,黄治江. 黄土高原九个水土保持树种根的抗拉力[J]. 中国水土保持,1988(9):47-49.  
 [16] 周跃,张军,骆华松,等. 松属、青冈属乔木侧根在防护林固土护坡作用中的意义[J]. 植物生态学报,2001,25(1):105-109.  
 [17] 史敏华,王棣. 石灰岩区主要水保灌木根系分布特征与根抗拉力研究初报[J]. 山西林业科技,1994(1):17-19.  
 [18] Operstein V, Frydman S. The influence of vegetation on soil strength[J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2000,4(2):81-89.  
 [19] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008, 305(1/2):207-226.  
 [20] Mattia C, Bischetti G B, Gentile F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2):23-32.

- [5] 潘树林, 辜彬, 杨晓亮. 土壤抗蚀性及评价研究进展[J]. 宜宾学院学报, 2011, 11(12): 101-104.
- [6] 王俭成, 杨建英, 史常青, 等. 北川地区典型林分土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 71-75.
- [7] 黄进, 杨会, 张金池. 桐庐生态公益林主要林分类型土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 49-52.
- [8] 吴鹏, 朱军, 崔迎春, 等. 黔中杠寨小流域不同植被类型土壤抗蚀性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8): 64-70.
- [9] 丛日亮, 黄进, 张金池, 等. 苏南丘陵区主要林分类型土壤抗蚀性分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1862-1867.
- [10] Manning A D, Fischer J, Lindenmayer D B. Scattered trees are keystone structures-implications for conservation[J]. *Biological Conservation*, 2006, 132(3): 311-321.
- [11] 林亚丽, 张文春. 巨桉无性系(组培苗)造林推广试验初报[J]. 四川林勘设计, 2006(2): 49-50.
- [12] 蓝贺胜, 曹汉洋, 黄秀美, 等. 巨桉家系与无性系造林对比试验初报[J]. 桉树科技, 2009, 26(2): 32-35.
- [13] 吴培衍. 巨尾桉优良无性系组培苗与扦插苗的造林效果[J]. 亚热带农业研究, 2006, 2(2): 94-96.
- [14] 石长金, 刘和民. 水土保持产业化经营的理论与模型研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 1999, 15(3): 209-212.
- [15] 丁文峰, 李占斌. 土壤抗蚀性的研究动态[J]. 水土保持科技情报, 2001, 1(1): 36-39.
- [16] Whalen J K, Hu Q, Liu A. Compost applications increase water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1842-1847.
- [17] 史东梅, 吕刚, 蒋光毅, 等. 马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 35-39.
- [18] 赵洋毅, 周运超, 段旭, 等. 黔中喀斯特地区不同植被土壤抗蚀性研究[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(5): 633-636.
- [19] 牛芳华, 李志辉, 王昌熙, 等. 尾巨桉幼苗根系分布及生物量特征研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 6-11.
- [20] 罗柳媚, 韦理电, 何斌, 等. 尾巨桉和厚荚相思人工林水源涵养功能研究[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(2): 220-224.
- [21] 廖建良. 组培苗无性系巨尾桉营林技术[J]. 惠州大学学报, 1997(4): 119-121.
- [22] 董慧霞, 李贤伟, 张健, 等. 不同草本层三倍体毛白杨林地土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 70-74.
- [23] 吴彦, 刘世全, 付秀琴, 等. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 45-49.

(上接第 57 页)

- [21] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 62-65.
- [22] 耿威, 王林和, 刘静, 等. 鄂尔多斯高原 3 种 4 龄—5 龄灌木根系抗拉特性初步研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2008, 29(3): 86-89.
- [23] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3445-3452.
- [24] 刘国彬, 蒋定生, 朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21-28.
- [25] Coutts M P. Root architecture and tree stability[J]. *Plant and Soil*, 1983, 71(1/3): 171-188.
- [26] 格日乐, 额尔敦花, 宋想斌, 等. 6 种水土保持植物枝条的数量特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 71-76.
- [27] 伯姆, 德榕, 协麟. 根系研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [28] 马红燕, 格日乐, 赵杏花. 排土场 2 种灌木根系数量特征研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 156-159.
- [29] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 329-335.
- [30] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20-23.
- [31] 赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 7-12.
- [32] 李勇著. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [33] 苑淑娟. 4 种植物单根抗拉力学特性的研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [34] 张永亮. 沙棘根系生物力学特性研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.