

4种植物生长旺盛期根系易受损的外力类型研究

李有芳¹, 刘 静¹, 张 欣², 苏 禹¹, 王晨嘉¹, 李雪松¹, 毛振华³, 刘 泉⁴

(1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019; 2. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010010;
3. 内蒙古鄂尔多斯市水土保持科学研究所, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 4. 内蒙古赤峰市敖汉旗水保站, 内蒙古 赤峰 024300)

摘要: 在植物生长旺盛期, 采用材料试验机测定 3~4 年生柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿在 1~4 mm 径级范围内的侧根分支处、相邻上级直根的抗拉力与抗折力, 研究 4 种植物根系易受损的外力类型。结果表明: 同径级条件下, 柠条和沙柳的侧根分支处、相邻直根均表现为抗拉力小于抗折力, 而沙棘和白沙蒿侧根分支处和相邻直根均表现为抗拉力大于抗折力。侧根分支处抗拉强度和抗折强度分别为: 柠条 $(23.70 \pm 3.97) < (33.66 \pm 7.74)$ MPa, 沙柳 $(14.86 \pm 1.28) < (17.31 \pm 1.91)$ MPa, 沙棘 $(10.61 \pm 2.40) > (3.97 \pm 1.23)$ MPa, 白沙蒿 $(5.07 \pm 1.25) > (2.18 \pm 0.39)$ MPa; 相邻直根的抗拉强度和抗折强度分别为: 柠条 $(28.02 \pm 4.40) < (47.06 \pm 4.41)$ MPa, 沙柳 $(20.33 \pm 1.76) < (27.54 \pm 3.82)$ MPa, 沙棘 $(15.86 \pm 3.90) > (8.75 \pm 1.71)$ MPa, 白沙蒿 $(8.80 \pm 1.74) > (6.15 \pm 1.01)$ MPa。在生长旺盛期, 造成柠条和沙柳根系易损的外力类型为轴向拉力, 造成沙棘和白沙蒿根系易损的外力类型为径向折力。同一径级下, 4 种植物根系的抗拉强度、抗折强度均为侧根分支处小于相邻上级直根。4 种植物根系抗拉强度和抗折强度的种间差异均为柠条 > 沙柳 > 沙棘 > 白沙蒿。在 4 种植物根系固土作用中, 1~1.5 mm 范围内的细根起主导作用。

关键词: 侧根分支处; 相邻上级直根; 抗拉力; 抗折力

中图分类号: S157.2; S793.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)06-0339-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.056

The Vulnerability of the Roots by Exogenetic Forces of 4 Plants in Vigorous Growth Period

LI Youfang¹, LIU Jing¹, ZHANG Xin², SU Yu¹,

WANG Chenjia¹, LI Xuesong¹, MAO Zhenhua³, LIU Quan⁴

(1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019; 2. Institute of Water Resources for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot 010010; 3. Ordos Institute of Soil and Water Conservation, Ordos, Inner Mongolia 017000; 4. Chifeng Institute of Soil and Water Conservation, Chifeng, Inner Mongolia 024300)

Abstract: To investigate the vulnerability of the roots by exogenetic forces, the anti-fracture force and the anti-tension force of lateral-root branches and adjacent upper straight roots diameters of 1 to 4 mm of 4 shrub species at the age of 3 to 4 years were measured with the testing machine in vigorous growing period. The 4 species were *Caragana Korshinskii* Kom., *Salix psammophila* C. Wang et Chang Y. Yang, *Hippophae rhamnoides* Linn. and *Artemisia sphaerocephala* Krasch. The results showed that the anti-fracture force of lateral-root branches was higher than anti-tension force for *C. Korshinskii* and *S. psammophila*, while the anti-fracture force of lateral-root branches were lower than the anti-tension force for *H. rhamnoides* and *A. Sphaerophala*. The same tendency was observed for the adjacent upper straight roots of 4 plants. The anti-tension strength and anti-fracture strength of lateral-root branches were as follows: *C. Korshinskii* were $(23.70 \pm 3.97) < (33.66 \pm 7.74)$ MPa, *S. psammophila* were $(14.86 \pm 1.28) < (17.31 \pm 1.91)$ MPa, *H. rhamnoides* were $(10.61 \pm 2.40) > (3.97 \pm 1.23)$ MPa, and *A. Sphaerophala* were $(5.07 \pm 1.25) > (2.18 \pm 0.39)$ MPa. The anti-tension strength and anti-fracture strength of adjacent upper straight roots were as follows: *C. Korshinskii* were $(28.02 \pm 4.40) < (47.06 \pm 4.41)$ MPa, *S. psammophila* were $(20.33 \pm 1.76) < (27.54 \pm 3.82)$ MPa, *H. rhamnoides* were $(15.86 \pm 3.90) > (8.75 \pm 1.71)$ MPa, and *A. Sphaerophala* were $(8.80 \pm 1.74) > (6.15 \pm 1.01)$ MPa. For *C. Korshinskii* and *S. psammophila*, the roots were be liable to be damaged by

收稿日期: 2016-06-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(51364034)

第一作者: 李有芳(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: lyfyzd123@163.com

通信作者: 刘静(1958—), 女, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: ljing58@126.com

anti-tension force in vigorous growing period. For *H. rhamnides* and *A. Sphaerphala*, the roots were liable to be damaged by anti-fracture force. The anti-tension strength and anti-fracture strength of lateral-root branches were lesser than those of adjacent upper straight roots with the same diameter. The anti-tension strength and anti-fracture strength between lateral-root branches and adjacent upper straight roots for the 4 species followed the sequence of *C. Korshinski*>*S. psammophila*>*H. rhamnides*>*A. Sphaerphala*. The roots with 1 to 1.5 mm played a leading role in the soil-fixing of 4 kinds of plants.

Keywords: lateral-root branch; adjacent upper straight root; anti-tension force; anti-fracture force

目前,植物根系固土抗蚀的力学机制成为水土保持领域的研究热点^[1-4]。当植物受大风拉拔,或地面有沉陷、斜向滑移等土体失稳现象发生时,土体中的根系可能分别承受 3 种类型的荷载:平行于单根根轴线的轴向拉力、垂直于单根根轴线的径向折力和径向弯力。植物直根轴向抗拉特性的研究已有较多报道^[5-8]。本课题组研究了 3~4 年生柠条、沙柳、沙地柏、沙棘和白沙蒿 5 种植物的直根和侧根分支处的抗拉特性^[9-10]、抗弯特性^[11]和抗折特性^[12]。材料的极限力就是使其丧失继续承受荷载的临界力。对于根系,在轴向拉力下会被拉断,在径向折力下会被折断,在承受极限弯曲力时,根仅仅产生弯曲变形丧失抗弯能力,并不断裂。因此,使根破坏的外力只有轴向拉力和径向折断力。然而,根系抵抗轴向拉力和径向折力的差异,易造成根系破坏的外力类型的研究,即特定植物根系易在折力作用下破坏,还是易在拉力作用下破坏;对所有植物根系易造成其破坏的外力类型是相同的,还是因植物种不同而异,目前均无报道。本文针对 3~4 年生的柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)、沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Chang Y. Yang)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch.)根系,研究每种植物 1~4 mm 径级范围内侧根分支处和相邻上级直根的抗拉力与抗折力、抗拉强度与抗折强度的差异,探讨 4 种植物根系易损的受力类型,以期进一步完善根系固土的力学机制,为不同侵蚀特点的区域有针对性的植被建设提供理论依据。

1 材料与方法

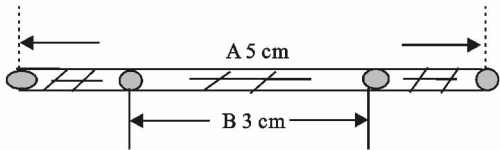
1.1 试验材料采集

试验区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县。在植物生长旺盛期(2015 年 8 月),选择分布均匀且长势良好的柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿样地,每种植物随机抽取 20~25 株植物,测量每株植物的地径、冠幅、株高,取各指标的平均值作为衡量该植物标准株的指标。选取标准株在其一侧由外逐渐向内进行挖掘并采集试验所需的根系。为保证后期室内试验时,根系的含水率为自然含水率,将采集好的根系用采样地的湿沙土覆盖,并置于恒温冰箱内(4℃),尽快完成试验。

1.2 试验根的选取与制备

1.2.1 抗拉试验根系的选取与制备 由于仪器的原因,在预试验过程中,>4 mm 的根径的根失败率很高,因此本试验中每种植物只选取 1~4 mm 径级范围内的侧根分支处及与它相邻的上级直根段试验。2 种根均以 0.5 mm 为一个径级进行分组,每一径级选取 20 根左右进行试验。

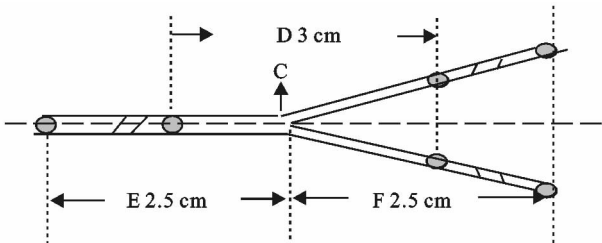
直根总长为 5 cm,具体见图 1。其中阴影部分为夹具夹持部位,夹具两端各 1 cm。由于在拉伸试验过程中,试验根系的断裂点位置不确定且根径沿轴向变化,因此以试验根中点为起点,向两端每隔 5 mm 对其进行标记并测量标记点的直径。试验结束后,将断裂点上下的 2 个标记点的直径取平均,即 5 mm 根长的平均直径作为该断裂点的直径;若断裂点位于标记点处,则该标记点直径即为断裂点的直径。直根段的标记点以十字交叉法测量 2 次,取 2 次直径平均值作为该点直径。



注:A 为相邻上级直根段;B 为相邻上级直根受力段。

图 1 试验根的相邻上级直根段

带有侧根分支处的试验根将侧根分支处位于试验根的中段,沿上级直根段的轴向总长同为 5 cm。具体见图 2。阴影部分为夹具夹持部位,夹具两端各 1 cm。由于侧根分支处根径横截面呈不规则圆形,因此每隔 120°测量 1 次直径,取 3 次直径平均值作为侧根分支处直径。



注:C 为侧根分支处;D 为侧根分支处受力段;E 为上级根;F 为下级根。

图 2 试验根的侧根分支段

1.2.2 抗折试验根系的选取与制备 抗折试验根系

的选取与制备方法同抗拉试验。其中带有侧根分支处的试验根与相邻上级直根段总长均 8 cm, 夹具两端各 2 cm, 即两种根受力段均为 4 cm。直根从中点向两端每隔 1 cm 作 1 个标记点并测量其直径, 标记点的测量方法同抗拉试验。带有侧根分支处的根段对侧根分支处每隔 120° 测量 1 次直径, 取 3 次直径平均值作为侧根分支处直径。

1.3 抗拉力和抗折力的测定

抗拉力和抗折力测定的加载速度均为 500 mm/min。抗拉试验施加轴向拉力, 抗折试验使试验根呈水平状态固定, 直根在受力段的中点施加点压力(图 1), 带有侧根分支处的试验根使侧根分支处位于受力段的中部, 用三点固定式夹具将上级根和两条下级根均呈水平状态固定, 在侧根分支处施加点压力(图 2)。采用材料试验机自动记录极限抗拉力和抗折力。对于本试验受折力作用的试验根, 受折力断裂是超静定状态, 没有通用的内力计算公式。根系在轴向直径是不均匀的, 为了排除根径的影响, 比较不同的根单

位根径的抗折力, 本文定义破坏处单位根横截面积上的抗折力为抗折强度, 计算公式同抗拉强度的计算公式。公式为:

$$P=4F/\pi D^2$$

式中: P 为抗拉强度/抗折强度(MPa); F 为抗拉力/抗折力(N); D 为根系断裂处直径(mm)。

1.4 根系微观结构测定

对 4 种植物直径为 3.5~4 mm 的直根进行徒手切片制作。采用 Motic BA210 生物显微镜对根系的解剖结构进行观察, Motic Images Plus 2.0 ML 软件对根系的解剖结构拍照, 对根横切面的次生韧皮部、次生木质部等结构进行分析对比。

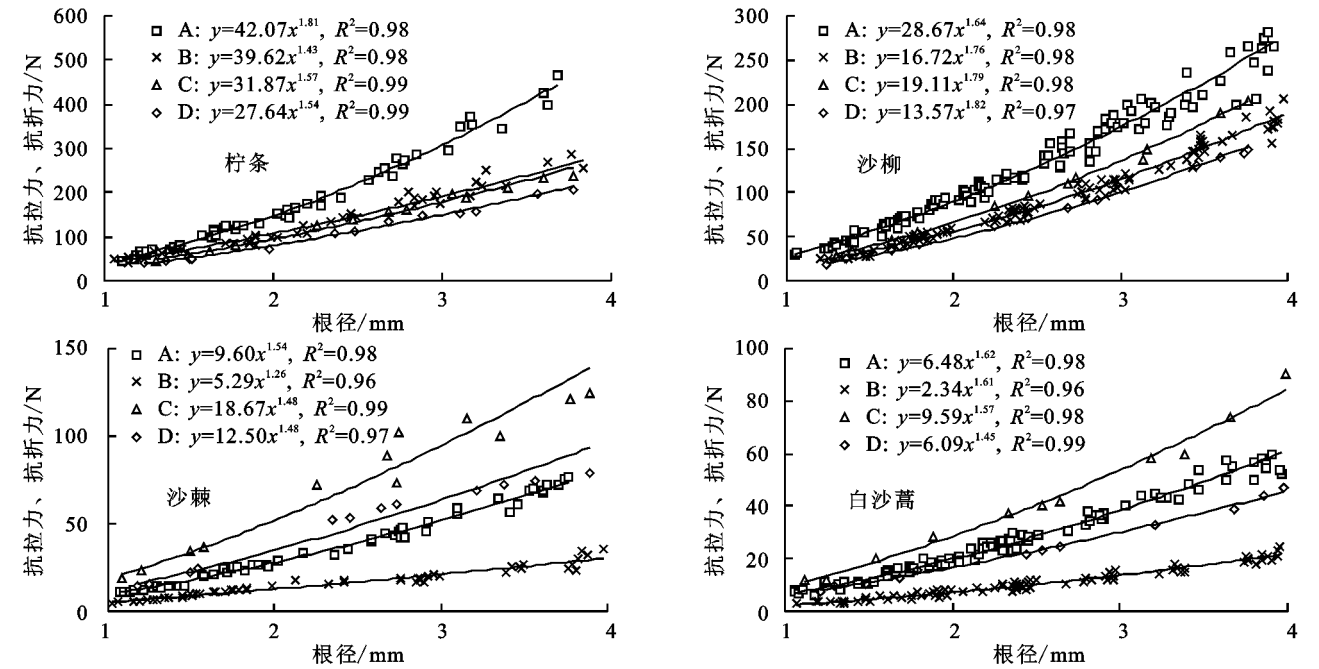
1.5 数据处理

采用 Excel 2007 和 SAS 9.0 软件处理数据。

2 结果与分析

2.1 不同植物根系对抗拉力和抗折力的影响

4 种植物侧根分支处和相邻上级直根的抗拉力和抗折力见图 3。



注: A 为直根抗折力; B 为侧根分支处抗折力; C 为直根抗拉力; D 为侧根分支处抗拉力。

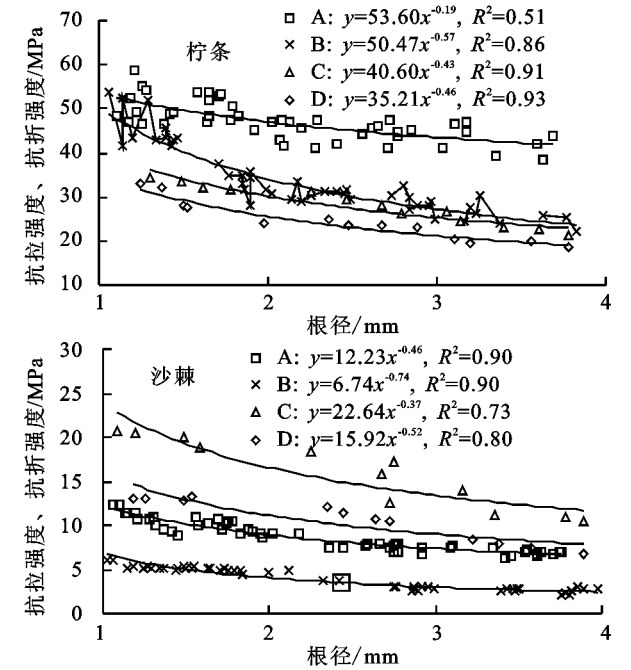
图 3 4 种植物侧根分支处、相邻上级直根的抗拉力与抗折力

4 种植物侧根分支处的抗拉力与抗折力间均存在显著性差异, 相邻上级直根的抗拉力与抗折力亦存在显著性差异($\alpha=0.05$)。但根系在承受相同大小的轴向拉力或径向折力时, 使其易受损的外力类型因植物而异。从图 3 可以看出, 柠条和沙柳的侧根分支处和相邻上级直根均表现为抗折力大于抗拉力, 而沙棘和白沙蒿反之。1~4 mm 径级范围内, 柠条侧根分支处抗拉力、抗折力为 39.65~207.02 N, 54.36~284.83 N, 相邻上级直根抗拉力、抗折力为 45.85~237.99 N, 55.51~434.41 N; 沙柳侧根分支处抗拉力、抗折力为 17.69~149.99 N,

25.91~186.46 N, 相邻上级直根抗拉力、抗折力为 28.39~204.33 N, 28.17~254.05 N; 沙棘侧根分支处抗拉力、抗折力为 14.30~78.75 N, 9.30~32.24 N, 相邻上级直根抗拉力、抗折力为 18.99~124.59 N, 12.99~71.59 N; 白沙蒿侧根分支处抗拉力、抗折力为 7.29~47.02 N, 3.28~27.16 N, 相邻上级直根抗拉力、抗折力为 11.67~90.01 N, 9.88~45.69 N。当植物根系受到外营力作用时, 柠条和沙柳的侧根分支处和相邻上级直根更易在轴向拉力作用下破坏, 而沙棘与白沙蒿的侧根分支处和相邻上级直根易在径向折力的作用下破坏。

侧根分支处抗拉力与抗折力的差值以及相邻上级直根抗拉力与抗折力的差值均随着根径的增加而增大。当根径为 1 mm 时,侧根分支处抗拉力与抗折力的差值为柠条-12.02 N,沙柳-3.21 N,沙棘 7.20 N,白沙蒿 3.84 N;相邻上级直根抗拉力与抗折力的差值为柠条-10.24 N,沙柳-9.67 N,沙棘 9.83 N,白沙蒿 3.15 N。当根径为 4 mm 时,侧根分支处抗拉力与抗折力的差值为柠条-56.41 N,沙柳-20.52 N,沙棘 66.80 N,白沙蒿 23.92 N;相邻上级直根抗拉力与抗折力的差值为柠条-236.14 N,沙柳-52.83 N,沙棘 63.77 N,白沙蒿 23.30 N。

4 种植物根系抗拉力、抗折力的大小均为侧根分支



注:A 为直根抗折强度;B 为侧根分支处抗折强度;C 为直根抗拉强度;D 为侧根分支处抗拉强度。

图 4 4 种植物侧根分支处、相邻上级直根的抗拉强度与抗折强度

方差分析可知,4 种植物侧根分支处的抗拉强度与抗折强度均存在显著性差异,相邻上级直根的抗拉强度与抗折强度同样存在显著性差异($\alpha=0.05$)。从图 4 可以看出,同径级条件下,柠条和沙柳侧根分支处的抗折强度大于抗拉强度,直根亦然;沙棘、白沙蒿侧根分支处的抗折强度小于抗拉强度,直根亦然。1~4 mm 径级范围内,柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿侧根分支处的抗拉强度分别为抗折强度的 75.1%,85.6%,274.3%,232.3%;4 种植物直根的抗拉强度分别为抗折强度的 63.2%,74.3%,186.2%,142.6%。

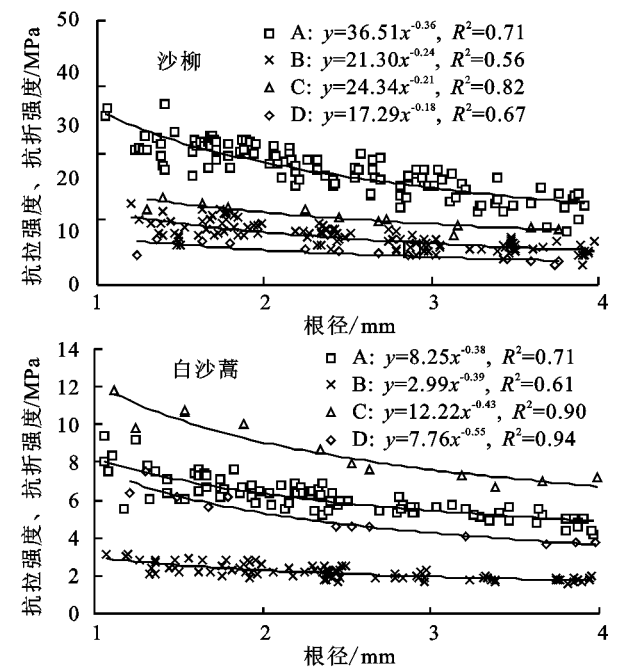
同一径级下,4 种植物根的抗拉强度和抗折强度同样为侧根分支处小于相邻上级直根。根径在 1~4 mm 范围内,柠条、沙柳、沙棘和白沙蒿侧根分支处抗拉强度为相邻上级直根的 85.5%,71.9%,67.1%,60.6%;4 种植物侧根分支处抗折强度为相邻上级直根的 75.2%,74.1%,48.5%,41.8%。根系主要是通

处<相邻上级直根。其中 4 种植物的代表根根径为 1.5 mm 时^[13-14],柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿侧根分支处和相邻上级直根的抗拉强度比值分别为 85.6%,72.1%,67.0%,60.6%;4 种植物侧根分支处和相邻上级直根的抗折强度比值分别为 80.9%,61.1%,49.3%,36.0%。

4 种植物侧根分支处和相邻上级直根的抗拉力种间差异为柠条>沙柳>沙棘>白沙蒿;4 种植物侧根分支处和相邻上级直根的抗折力种间差异同为柠条>沙柳>沙棘>白沙蒿。

2.2 不同植物根系对抗拉强度和抗折强度的影响

4 种植物侧根分支处和相邻上级直根的抗拉强度和抗折强度见图 4。



过由侧根和直根构成的根系网进行土壤的固持,当侧根分支处和直根同时受到外营力时,4 种植物都表现为侧根分支处抵抗外营力的能力不及相邻上级直根,较柠条、沙柳而言,沙棘和白沙蒿侧根分支处在土体中发挥的抵抗外营力的能力与相邻上级直根相差较远,而柠条与沙柳的侧根分支处抗拉强度、抗折强度与相邻上级直根抗拉强度、抗折强度相差较小,且均大于沙棘与白沙蒿。由此推断,无论是轴向拉力作用下还是径向折力作用下,柠条和沙柳根系网抵抗外力的性能较好,沙棘和白沙蒿较差。

4 种植物种间差异为侧根分支处抗拉强度和抗折强度均为柠条(23.70,33.66 MPa)最大,沙柳次之(14.86,17.31 MPa),沙棘(10.61,3.97 MPa)大于白沙蒿(5.07,2.18 MPa);相邻上级直根抗拉强度和抗折强度同样为柠条(28.02,47.06 MPa)最大,沙柳(20.33,27.54 MPa)次之,沙棘(15.86,8.75 MPa)

大于白沙蒿(8.80,6.15 MPa)。

2.3 根径对抗拉强度和抗折强度的影响

4种植物根径不同,其抵抗外营力的能力不同。由图3和图4可以看出,4种植物侧根分支处和相邻上级直根的抗拉力、抗折力均与直径呈幂函数正相关;抗拉强度、抗折强度均与直径呈幂函数负相关。同一种植物侧根分支处和相邻上级直根的抗拉强度、抗折强度均随根径的增加而减小。对于侧根分支处,柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿径级1~1.5 mm与3.5~4 mm范围内的抗拉强度比值分别为142.0%,116.5%,150.0%,163.9%,其抗折强度比值分别为116.7%,163.9%,195.9%,141.5%;对于相邻上级直根,4种植物径级1~1.5 mm范围内与径级3.5~4 mm范围内的平均抗拉强度比值分别为134.4%,117.9%,155.0%,148.0%,其抗折强度比值分别为115.5%,130.6%,149.3%,140.8%。由此可见,4种植物1.5~2 mm径级范围内的根系较3.5~4 mm径级范围内的根系有更大的抗拉强度和抗折强度,说明4种植物的细根单位根径抵抗外力的能力强于粗根。邢会文和张永亮等^[13-14]对4种植物代表根的研究得到柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿代表根径级范围分别为0~1.5 mm,0.5~2 mm,1~1.5 mm,0.5~2 mm,4种植物在代表根径级范围内的累计根数占总根数的百分比分别为78.8%,52.2%,74.0%,48.1%,代表根的累积长度分别占各自根系总长度的89.7%,61.0%,58.2%,46.8%,代表根的累积表面积分别占各自总体根系表面积的59.5%,34.5%,28.9%,26.0%,即4种植物根系的组成均以1~1.5 mm范围内的细根为主。因此,在柠条、沙柳、沙棘、白沙蒿根系固土作用中,1~1.5 mm范围内的细根起主导作用。

3 讨论

本研究中,柠条和沙柳根系表现为抗折强度大于抗拉强度,沙棘和白沙蒿根系表现为抗拉强度大于抗折强度;4种植物根系抗拉强度和抗折强度为柠条>沙柳>沙棘>白沙蒿。

造成上述4种植物根系力学差异的原因与植物根系的微观结构有关^[15-16]。根系的微细纤维在生长初期构成具有支持作用的网状骨架,随着根系的次生长,各种次生组织的出现以及木质素和纤维素的不断寄存使纤维之间黏结加固,增加根系的机械强度^[17-18]。

4种植物3.5~4 mm的直根横截切图显示同径级下,柠条和沙柳直根的横截面中次生微管组织即次生韧皮部和次生木质部占横截面总面积的比例较大,分别为87.3%,86.2%,且柠条和沙柳次生韧皮部的薄壁细胞、筛管均排列紧密,根系导管壁和木薄壁细

胞壁都较厚,且2种植物根系纤维素和木质素含量均较多,进一步稳固了具有支撑作用的木纤维网状结构。沙棘和白沙蒿直根的横截面中次生微管组织占横截面总面积的比例较小,分别为74.2%,65.9%,沙棘韧皮部薄壁细胞等结构排列疏松且次生木质部所占比例最小,仅为14.3%,白沙蒿次生韧皮部占根横截面积的百分比在4种植物中最少,为31.4%,且白沙蒿木质部内薄壁细胞被较大细胞间隙隔开。由此可见,柠条和沙柳的次生微管组织发达,使得二者的抗拉强度和抗折强度较大,沙棘和白沙蒿的次生微管组织发展相对较弱且细胞排列疏松,使得二者的抗拉强度和抗折强度较小。

由此推断,4种植物根系抵抗轴向拉力和径向折力的能力不同,与其微观结构的差异性具有一定的关联。如柠条周皮木栓层细胞壁薄、栓质化,使其在受力时细胞不易产生相对位移,从而增强了柠条抵抗径向折力的能力;沙棘和白沙蒿周皮较厚,排列紧密,在一定程度上提高了根系的抗拉强度,使沙棘和白沙蒿在抵抗轴向拉力方面占有一定优势,具体的影响机制有待进一步研究。

综上所述,次生微观组织所占根截面的面积比例、细胞结构排列、木质素和纤维素含量以及周皮结构都是影响根系抗拉、抗折性能的因素,根系的力学特性同时受土壤含水率、加载速率等多种环境因素的影响,今后的研究应将影响根系力学特性的外界环境因素和根系内部微观结构相结合,进行深入研究和探讨。

4 结论

(1)植物根系在承受相同大小的轴向拉力或径向折力时,使其受损的外力类型因植物而异,没有共性。对于柠条和沙柳,同径级的侧根分支处的抗折力大于抗拉力,直根同理,而沙棘和白沙蒿同径级的侧根分支处的抗折力小于抗拉力,直根同理。造成上述4种植物根系力学差异的原因与植物根系的微观结构有关。

(2)柠条和沙柳根系的抗折强度大于抗拉强度,而沙棘与白沙蒿根系的抗折强度小于抗拉强度。侧根分支处抗拉强度和抗折强度:柠条分别为(23.70±3.97) MPa,(33.66±7.74) MPa;沙柳分别为(14.86±1.28) MPa,(17.31±1.91) MPa;沙棘分别为(10.61±2.40) MPa,(3.97±1.23) MPa;白沙蒿分别为(5.07±1.25) MPa,(2.18±0.39) MPa;直根抗拉强度和抗折强度:柠条分别为(28.02±4.40) MPa,(47.06±4.41) MPa;沙柳分别为(20.33±1.76) MPa,(27.54±3.82) MPa;沙棘分别为(15.86±3.90) MPa,(8.75±1.71) MPa;白沙蒿分别为(8.80±1.74) MPa,(6.15±1.01) MPa。

(3)同一径级下,4种植物根系的抗拉强度、抗折强度均为侧根分支处小于相邻上级直根。4种植物

根系抗拉强度和抗折强度的种间差异均为柠条>沙柳>沙棘>白沙蒿。在 4 种植物根系固土作用中, 1~1.5 mm 范围内的细根起主导作用。

参考文献:

- [1] Gian B B, Enrico A C, Tommaso S, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1): 11-22.
- [2] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of sterambanks: Accounting for soil shear strength and moisture [J]. Catena, 2007, 69(3): 197-205.
- [3] 吴鹏, 谢朋成, 宋文龙, 等. 基于根系形态的植物根系力学与固土护坡作用机理[J]. 华中科技大学学报, 2014, 42(5): 139-142.
- [4] 刘福全, 刘静, 璠珉, 等. 植物枝叶与根系耦合固土抗蚀的差异性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 411-418.
- [5] Zhang C B, Chen L H, Jiang J, et al. Effects of gauge length and strain rate on the tensile strength of tree roots[J]. Trees, 2012, 26: 1577-1584.
- [6] Comino E, Marengo P. Root tensile strength of three shrub species: *Rosa canina*, *Cotoneaster dammeri* and *Juniperus horizontalis*: Soil reinforcement estimation by laboratory test[J]. Catena, 2010, 82(3): 227-235.
- [7] 万娟, 肖衡林, 何俊, 等. 多花木兰根系抗拉特性及边坡稳定性分析[J]. 华中科技大学学报, 2014, 42(8): 109-113.
- [8] 田佳, 曹兵, 及金楠, 等. 防风固沙灌木花棒沙柳根系生

(上接第 299 页)

参考文献:

- [1] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2): 409-417.
- [2] Filgueira R R, Fournier L L, Cerisola C I, et al. Particle-size distribution in soils: A critical study of the fractal model validation[J]. Geoderma, 2006, 134(3/4): 327-334.
- [3] 李毅, 李敏, 曹伟, 等. 农田土壤颗粒尺寸分布分维及颗粒体积分数的空间变异性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 94-102.
- [4] 高君亮, 李玉宝, 虞毅, 等. 毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 220-223.
- [5] 曹樱子, 王小丹. 藏北高寒草原土壤粒径分布分形维数特征[J]. 山地学报, 2014, 32(4): 438-443.
- [6] 张秦岭, 李占斌, 徐国策, 等. 丹江鸚鵡沟小流域不同土地利用类型的粒径特征及土壤颗粒分形维数[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 244-249.
- [7] 丁杨, 张建军, 茹豪, 等. 晋西黄土区不同林地土壤团聚体分形维数特征与土壤养分相关关系[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(4): 42-46.
- [8] Gao G L, Ding G D, Wu B. Fractal scaling of particle size distribution and relationships with top soil properties affected by biological soil crusts[J]. PLoS One, 2014, 9(2): e88559.

- 物力学特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 192-198.
- [9] 苑淑娟. 4 种植物单根抗拉力学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [10] 刘晓敏. 5 种植物侧根分支处分支处抗拉力学特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013.
- [11] 刘玥, 刘静, 张格, 等. 二种植物同径级直段根和侧根分支处抗弯力学特性的研究[J]. 北方园艺, 2014(19): 16-19.
- [12] 刘鹏飞, 刘静, 朱宏慧, 等. 4 种植物生长旺盛期侧根分支处与相邻上级直根抗折特性的差异[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 33-39.
- [13] 邢会文, 姚喜军, 刘静, 等. 4 种植物代表根的研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2008, 29(4): 22-25.
- [14] 张永亮. 沙棘根系生物力学特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [15] 蒋坤云, 陈丽华, 盖小刚, 等. 华北护坡阔叶树种根系抗拉性能与其微观结构的关系[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 115-123.
- [16] 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): 1-9.
- [17] 艾素云, 黄玉源, 伍映辉. 贵州苏铁根的解剖学研究[J]. 云南植物研究, 2006, 28(2): 149-156.
- [18] Duan C R, Wang B C, Wang P Q, et al. Relationship between the minute structure and the lodging resistance of rice stems[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2004, 35(3): 155-158.

- [9] 陈梦棋. 重庆市土地整理项目土壤颗粒分形与养分特征研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2015.
- [10] 邓良基, 林正雨, 高雪松, 等. 成都平原土壤颗粒分形特征及应用[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 38-42.
- [11] 胡钟胜, 解燕, 刘国庆, 等. 云南宣威市烟田耕作层土壤颗粒分形特征研究[J]. 土壤通报, 2014(5): 1038-1041.
- [12] 范燕敏, 朱进忠, 武红旗. 北疆退化荒漠草地土壤颗粒的分形特征[J]. 草原与草坪, 2008, (4): 10-13, 19.
- [13] 樊立娟, 胡广录, 廖亚鑫, 等. 河西走廊斑状植被区表层土壤粒径及其分形维数的空间变异特征[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1068-1075.
- [14] 王力, 王全九, 石滨嘉夫, 等. 安达市碱性草地土壤颗粒的分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 63-67.
- [15] 郭中领, 符素华, 王向亮. 北京地区表层土壤分形特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 154-158.
- [16] 叶雅杰, 罗金明, 许林书. 松嫩平原盐碱地土壤颗粒分形维数研究及其应用[J]. 长春师范大学学报, 2005, 24(7): 103-106.
- [17] 李进峰, 宫溯波, 陈林武, 等. 广元市不同土地利用类型土壤的分形特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 167-170.
- [18] 单桂梅, 张春平, 刘霞, 等. 沂蒙山区小流域坡耕地土壤颗粒结构与养分退化特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 76-82.