

网络出版时间:2015-10-13 08:46

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2015.11.013

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20151013.0846.026.html>

5 种植物侧根分支处的抗拉力学特性研究

姚喜军^{1,2}, 王林和¹, 刘 静¹, 刘小敏¹

(1 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2 内蒙古自治区土地调查规划院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

【摘 要】 【目的】探讨 3~4 年生柠条(*Caragana microphylla* Lam.)、沙地柏(*Sabina vulgaris* Ant.)、沙柳(*Salix psammophila* C. wang et Ch Y. Yang)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch.)和沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)侧根分支处的抗拉力学特性,为植物固土护坡提供理论基础。【方法】在鄂尔多斯准格尔旗境内和林格尔县境内采集 5 种植物根系,每种植物采 3 株标准株,对直径 0.5~4 mm 的根系按 0.5 mm 分级,采用织物强力机(加载速度为 200 mm/min)测定 5 种植物各径级根系的室内轴向抗拉力并计算抗拉强度,同时分析根型(鲢骨型、二分枝型)、生长时期(生长季初期(5 月)、生长旺盛期(8 月))、土壤含水量(0%, 6.8%, 18.8%, 26.6%)对侧根分支处抗拉强度的影响。【结果】5 种植物侧根分支处断裂比例均在 60%以上,侧根分支处抗拉能力明显不及相邻的直段根;无论是鲢骨型还是二分枝型,5 种植物侧根分支处的抗拉力均低于相邻直段根的抗拉力,柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿和沙棘直段根的抗拉力分别是相邻侧根分支处抗拉力的 1.39 倍、1.33 倍、1.46 倍、1.63 倍和 1.91 倍;5 种植物 2 种根型侧根分支处抗拉力和抗拉强度的种间差异相同,均表现为柠条>沙柳>沙地柏>沙棘>白沙蒿,根型对其影响不显著;生长旺盛期柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿、沙棘侧根分支处抗拉强度均值分别为 30.57, 18.19, 9.52, 8.54 和 5.34 MPa,生长季初期分别为 26.79, 15.25, 10.17, 6.76 和 6.10 MPa,生长时期对 5 种植物侧根分支处抗拉强度的影响均在 $\alpha=0.01$ 水平下差异显著;5 种植物侧根分支处的抗拉强度均随周边土壤含水量的增大而减小,土壤含水量对其影响显著。【结论】5 种植物侧根分支处是根系抗拉的薄弱点,其抗拉力是正确评价植物根系抗拉力学特性的关键。

【关键词】侧根分支处;直段根;抗拉力;抗拉强度

【中图分类号】S157.2

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2015)11-0091-08

Mechanical properties of tensile at lateral branches of five plants

YAO Xi-jun^{1,2}, WANG Lin-he¹, LIU Jing¹, LIU Xiao-min¹

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

2 Inner Mongolia Land Surveying and Planning Institute, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: 【Objective】The study discussed tensile mechanical properties at lateral root branches of 3—4 years old *Caragana microphylla* Lam., *Salix psammophila* C. wang et Ch Y. Yang, *Sabina vulgaris* Ant., *Artemisia sphaerocephala* Krasch., and *Hippophae rhamnoides* Linn. to provide theoretical basis for soil slope protection by plants. 【Method】Roots of five plants in ZhunGer and He Lingle, ordos were collected with three standard strains for each plant. The roots with diameters of 0.5—4 mm were graded by every 0.5 mm and the axial tensions of roots in each diameter class were measured using fabric strength machine (load speed of 200 mm/min) to calculate tensile strengths. Then the effects of root type (herring bone pattern and two branching type), growth period (early growing season and growing season), and soil water content (0%, 6.8%, 18.8%, and 26.6%) on the tensile at lateral branches were analyzed. 【Result】

【收稿日期】2015-01-16

【基金项目】内蒙古自治区自然科学基金重点项目(2010ZD16)

【作者简介】姚喜军(1983—),男,内蒙古呼和浩特人,在读博士,主要从事水土保持研究。E-mail: yaoxj83@163.com

【通信作者】王林和(1949—),男,内蒙古丰镇人,教授,博士生导师,主要从事沙生植物资源保护与利用研究。

E-mail: wlinhe@hotmail.com

Breaking ratios of lateral branches of the five plants were all more than 60%, indicating that the stretch resistance at lateral branch was significantly less than at straight section adjacent. Tensile at lateral branches of the five plants was lower than that at the adjacent straight segments for both the herring bone type and the dichotomous type. The root tensile strengths at the straight section of *C. microphylla* Lam., *S. psammophila* C. wang et Ch Y. Yang, *S. vulgaris* Ant., *A. sphaerocephala* Krasch., and *H. rhamnoides* Linn. were 1.39, 1.33, 1.46, 1.63 and 1.91 times of tensile strength at the lateral root, respectively. Interspecific differences in the tensile strengths and tensile intensities at lateral branches of five plants and two types were all same in the order of *C. microphylla* > *S. psammophila* > *S. vulgaris* > *H. rhamnoides* > *A. sphaerocephala*. Root type had no significant effects. At the vigorous growth period, the mean values of tensile strength of lateral root branches for *C. microphylla*, *S. psammophila*, *S. vulgaris*, *H. rhamnoides*, and *A. sphaerocephala* were 30.57, 18.19, 9.52, 8.54 and 5.34 MPa, while at the early growing season, the values were 26.79, 15.25, 10.17, 6.76 and 6.10 MPa, respectively. The effects of growth period on tensile strength of lateral root branches among the five plants were significant ($\alpha=0.01$). The tensile strengths of lateral root branches of the five plants decreased when the soil moisture increased and the influence of soil moisture was significant. 【Conclusion】 The lateral root branches of the five plants were vulnerable in tensile resistance of the root system, and their tensile resistances were key to accurately evaluate mechanical properties of plant roots.

Key words: lateral root branch; straight section root; anti-tension; tensile strength

近年来,在植被固土护坡中,灌木、半灌木植物根系在浅层土体加固中起着至关重要的作用,由于它们的存在,土体可以看作是一个特殊的复合体材料,即根-土复合体,根系在其中起到了加筋作用,从而提高了土体的强度,达到了固持土体的目的^[1-4]。

植物根系主要由垂直根系和侧向根系两部分组成,垂直根系可以将浅层土体锚固到深层土上,增加土体的迁移阻力,从而加固土层,一定程度上抑制滑坡,而侧向根系可以提高根土复合体的整体强度^[5-7]。近年来对侧根的研究主要集中在两个方面,一方面是对侧根根土粘合键的研究^[5],主要集中在对根土界面摩阻特性和根土复合体抗剪强度的研究。例如,宋维峰等^[8]、邢会文等^[9]将工程学上加筋材料的摩擦阻力引入到根系与土体界面之间的相互作用,并首次提出了根土界面摩擦系数的概念;杨亚川等^[10]、刘国彬等^[11]研究了草本植物根系的抗剪强度,其结果表明牧草毛根具有强大的抗拉能力,且抗拉力随根直径的增加而增大,根龄对抗拉力的影响因种而异;宋维峰等^[12]研究了林木根土复合体的抗剪强度,发现根系能使坡面表层的应力传递到土层深处,并弱化一定深度土层土体的应力,具有一定的固土作用;杨永红等^[13]研究了影响根土复合体抗剪强度的因素;张欣等^[1]分析了柠条、沙柳等灌木根系对提高土体抗剪强度的作用。侧根研究另一方面是针对根的抗拉强度,目前由于试验条件的制约,对植

物根系抗拉力学特性的研究均针对直段根进行^[14-15]。而对于侧根分支处抗拉强度的研究鲜见报道,侧根分支处在主根与侧根之间起着纽带作用,对其断裂强度的研究将很好地解释植物根系网络固土的内在机理。

直段根抗拉力学特性的研究均采用强力机进行测定,而针对侧根分支处力学特性的研究,由于没有专用夹具,至今未见报道。本研究以 3~4 年生柠条(*Caragana microphylla* Lam.)、沙地柏(*Sabina vulgaris* Ant.)、沙柳(*Salix psammophila* C. wang et Ch Y. Yang)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala* Krasch.)和沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)为研究对象,通过轴向拉伸试验,研究直段根与侧根分支处抗拉力学特性的差异,以及根型、生长时期和土壤含水量等因素对侧根分支处抗拉力学特性的影响,以期阐明植物根系的固土机理奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

在内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗境内,挑选长势良好、分布均匀的柠条、沙地柏、沙柳、白沙蒿样地,在每种植物的样地内随机抽取 20 株作为一个样本,对每株植物重复 3 次测其株高、冠幅等指标,取各指标的均值作为衡量该株植物的综合指标。然后在各样地内选取与综合指标接近的 3~4 年生植株作为

标准株,将标准株根系采用整株挖掘法取样。在内蒙古和林格尔县沙棘基地选取 3~4 年生沙棘样地,随机选取 20 株,测试指标及标准株的选取方法与上述 4 种植物相同,取样方法同样采用整株挖掘法。取样完毕,用大型密封袋将挖出的根部土壤连同完整的根系一并带回实验室,清理后将根系及时放在 4℃ 冰箱中保存待测。

1.2 测试根的制备

每种植物选择侧根分支处直径(分支处的直径每隔 120° 测量 1 次,取 3 次平均值作为分支处的直径)0.5~4 mm 的根系按 0.5 mm 分级,以分支处为中心,沿 3 个根轴线方向分别量取 15 mm 作为试验根进行拉伸试验,每径级 20 个重复。从分支处开始分别在 3 个方向的直根段上每隔 5 mm 做标记,用游标卡尺十字交叉测量标记处的直径,并取平均值。

1.3 测试方法

采用 YG(B)026H-250 型织物强力机,加载速度为 200 mm/min,自制三点可变角度夹具,将上级根垂直固定于强力机夹具上,将 2 条下级根分别用自制的三点可变角度夹具固定,再固定于强力机下夹具,调整可变角度夹具的角度,使 2 条下级根处于轴向受拉状态(图 1)。对于直段根取断裂处前后 2 个标记的直径平均值作为断裂处的直径。抗拉强度通过最大抗拉力与断裂处的横截面积计算。在试验过程中夹口处断裂的视为无效数据。



图 1 自制夹具固定的测试根

Fig. 1 Homemade fixture fixed test

1.4 研究内容与方法

1.4.1 轴向拉力作用下 5 种植物侧根分支处的断裂特征 侧根分支处断裂特征的研究中,根系取样时期为生长旺盛期(8 月份),对侧根类型(含鲱骨型和二分枝型)并未进一步区分。试验采用自制夹具对直段根和分支侧根进行了拉伸试验。试验分析了夹口处断裂根数、有效试验根数、直段处断裂根数和分支处断裂根数等指标。

1.4.2 5 种植物侧根分支处与相邻直段根的抗拉

力学特性 所用根系的取样时期为生长旺盛期(8 月份),考虑到在实际操作过程中二分枝型侧根易获取的特点,统一选取二分枝型侧根。试验测定并计算了能够反映根系力学特性的抗拉力和抗拉强度以及对其变化影响显著的根径。

1.4.3 根型对 5 种植物侧根分支处抗拉强度的影响 侧根类型可分为鲱骨型和二分枝型 2 种根系构型。由于 2 种根型的试验根在轴向拉伸过程中受力的角度不同,考虑到其力学特性可能有所差异,因此取 2 种根型的试验根分别进行拉伸试验,取样时期为生长旺盛期(8 月份)。

1.4.4 生长时期对 5 种植物侧根分支处抗拉强度的影响 本试验分 2 个不同时期进行取样,分别为生长季初期(5 月份)和生长旺盛期(8 月份),采用二分枝型根进行试验。

1.4.5 土壤含水量对 5 种植物侧根分支处抗拉强度的影响 根据取样地土壤水分条件,设计 0%, 6.8%, 18.8% 和 26.6% 4 个不同的土壤含水量梯度进行环境水分影响的研究。试验所用土壤均采自样地,将所取的土壤在自然状态下风干,称取一定质量的风干土置于密闭的玻璃器皿内,然后按照试验设计的含水量梯度,根据公式计算各自的需水量,用量筒称取定量的水分别加入对应的玻璃容器内搅拌均匀用于试验。每种植物每一径级取 80 条测试根,平均分成 4 组,分别置于 4 个不同含水量梯度的土壤中保存一昼夜,然后进行轴向拉伸试验。

1.5 数据分析

试验数据均采用 Excel 2003 与 SAS 9.0 软件进行处理,其中运用 Excel 2003 进行图表制作,运用 SAS 9.0 进行相关性分析与方差分析。

2 结果与分析

2.1 轴向拉力作用下 5 种植物侧根分支处的断裂特征

本试验中,5 种植物有效试验根的数量不等,在 30~100 根。根据 5 种植物的有效试验根在受拉条件下断裂的方式来看,根系受拉后多数在侧根分支处断裂。由图 2 可知,白沙蒿侧根分支处断裂数占有效试验根数的 73.75%,沙柳、柠条、沙地柏、沙棘分别占 96.36%,98.98%,79.45% 和 64.52%,侧根分支处断裂比例均在 60% 以上,由此可以推断,侧根分支处抵抗拉力的能力不及相邻的直段根。由图 2 可知,柠条和沙柳根系最易在侧根分支处断裂,沙棘根系与其他几种根系相比不易在侧根分支处断

裂。本课题组在前期大量试验中发现,柠条、沙柳直段根都具有较好的抗拉性能,而白沙蒿直段根的抗拉强度低于柠条和沙柳,但是本试验中白沙蒿侧根分支处的抗拉性能明显优于柠条和沙柳,这为进一步研究 5 种植物的综合固土效能提供了有效的试验依据。

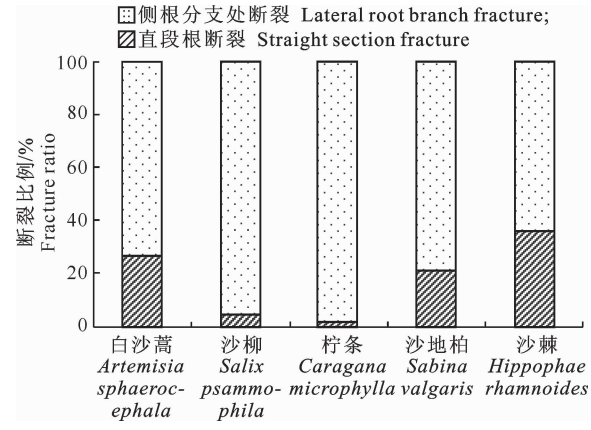


图 2 5 种植物侧根的断裂情况

Fig. 2 Lateral root breaking test of the five plants

2.2 5 种植物侧根分支处与相邻直段根抗拉力学特性的差异

图 3 表明,5 种植物均为侧根分支处抗拉力小于相邻直段根抗拉力,且随着根系直径的增加呈现很好的幂指数关系。柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿、沙棘直段根平均抗拉力分别为侧根分支处的 1.39 倍、1.33 倍、1.46 倍、1.63 倍和 1.91 倍。根据以上侧根分支处与相邻直段根抗拉力的倍数关系可以推断,在植物根系固土(锚固)过程中,直段根的作用要大于侧根分支处的作用。由于沙棘、白沙蒿直段根与相邻侧根分支节点处抗拉力存在较大差异,因此推测其是由于不同部位根系的组成结构存在较大差异,导致力学性能发生很大变化的。试验过程中发现,沙棘和白沙蒿侧根分支处与直段根在植物纤维组成上确实差异较大,而柠条和沙柳直段根与相邻侧根分支节点处的抗拉力相差较小,这与柠条、沙柳侧根分支节点处根系的生物组成结构和直段根的差异较小有关。

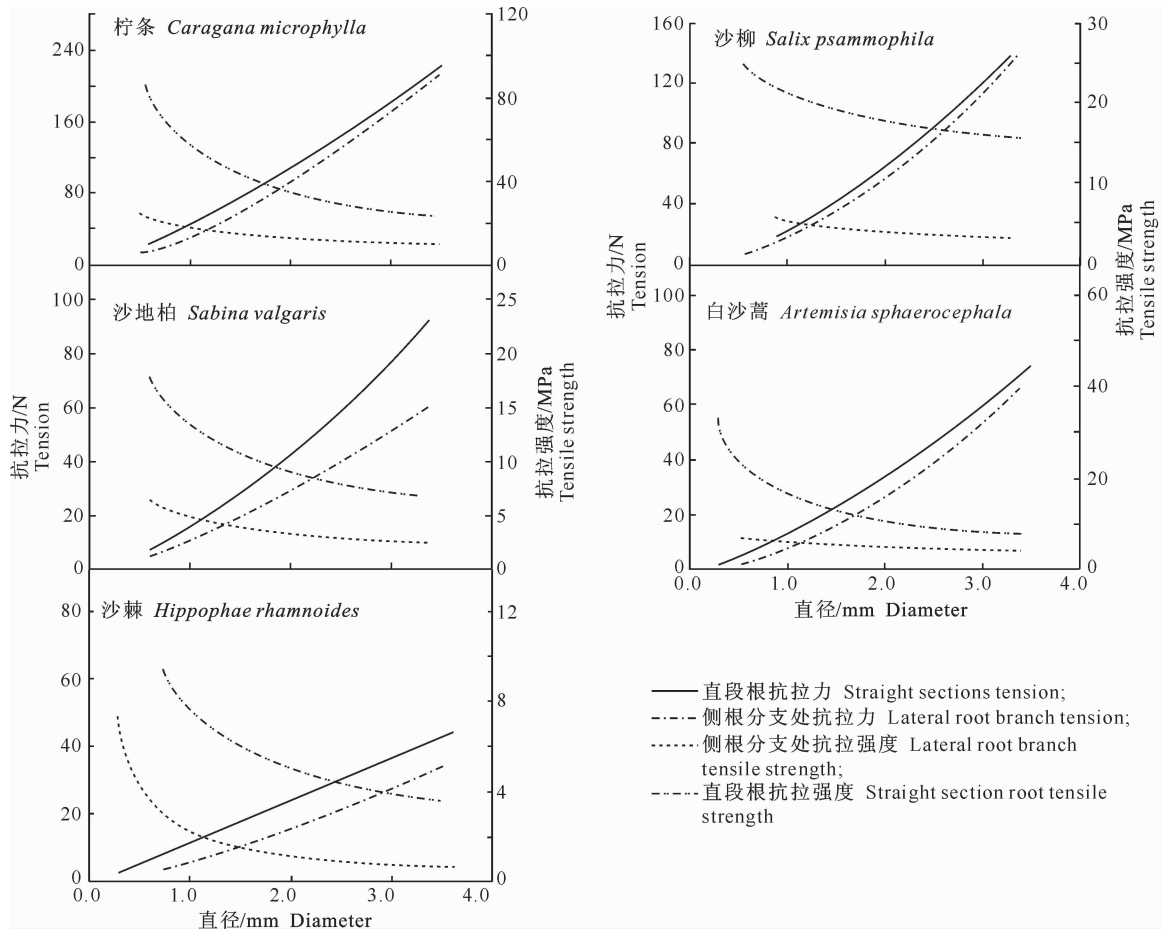


图 3 5 种植物侧根分支处与直段根抗拉力及抗拉强度的比较

Fig. 3 Comparison of tensile resistance and tensile strength at lateral root branch and straight segment root of the five plants

从图 3 还可以看出,随根直径的变化,5 种植物直段根和侧根分支处的抗拉强度与直径均有很好的负相关关系。同一种植物直段根与侧根分支处的抗拉强度均随直径的增加而减小,说明直径较小的细根具有较强的抗拉强度。为了进一步量化直段根与侧根分支处抗拉强度的差异,分别将 5 种植物直段根和侧根分支处的抗拉强度与直径进行拟合,结果显示,5 种植物直段根和侧根分支处的抗拉强度与直径之间呈显著的幂函数负相关关系,同一种植物直段根的抗拉强度均大于侧根分支处的抗拉强度。无论直段根还是侧根分支处的抗拉强度,5 种植物均表现为柠条>白沙蒿>沙柳>沙地柏>沙棘。该排序结果显示,5 种植物抗拉强度排序与侧根分支处断裂难易程度的排序略有不同,值得进一步研究。

2.3 侧根分支处抗拉强度的影响因素

2.3.1 根型 从图 4 可看出,5 种植物鲃骨型侧根分支处抗拉强度均随着该处直径的增大呈降低趋势,其中以柠条侧根分支处抗拉强度的降低幅度最为明显,沙棘次之,沙柳、沙地柏和白沙蒿较小。

在直径为 0.5~4 mm 且直径相同的条件下,5 种植物鲃骨型侧根分支处的抗拉强度大小依次为柠条>沙柳>沙地柏>沙棘>白沙蒿。在侧根分支处代表根径级范围内,当直径为 1 mm 时,柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿和沙棘鲃骨型侧根分支处的抗拉强

度分别为 34.198,16.807,13.430,7.992 和 9.254 MPa,柠条侧根分支处抗拉强度约为沙柳的 2 倍、沙地柏的 2.5 倍;沙柳侧根分支处的抗拉强度约为沙地柏的 1.3 倍、白沙蒿和沙棘的 2 倍。

从图 5 可以看出,5 种植物二分枝型侧根分支处抗拉强度均随着该处直径的增大呈降低趋势,其中以柠条侧根分支处抗拉强度的降低幅度最为明显,沙棘次之,沙柳、沙地柏和白沙蒿均较小。

在直径为 0.5~4 mm 且直径相同的条件下,5 种植物二分枝型侧根分支处的抗拉强度大小依次为柠条>沙柳>沙地柏>沙棘>白沙蒿。在侧根分支处代表根径级范围内,当直径为 1 mm 时,柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿和沙棘二分枝型侧根分支处的抗拉强度分别为 33.237,17.178,14.857,8.426 7 和 10.144 MPa,柠条侧根分支处抗拉强度约为沙柳的 2 倍、沙地柏的 2.4 倍;沙柳侧根分支处的抗拉强度约为沙地柏的 1.2 倍、白沙蒿的 2 倍、沙棘的 1.7 倍。

对柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿、沙棘 5 种植物鲃骨型和二分枝型侧根分支处分别取直径 0.95,1.00 和 1.05 mm,通过回归模型得到相应根型侧根分支处的抗拉强度值,对其进行方差分析,结果显示 2 种根型在检验水平 $\alpha=0.1$ 下无显著差异,说明不同根型侧根分支处的抗拉强度无明显区别。

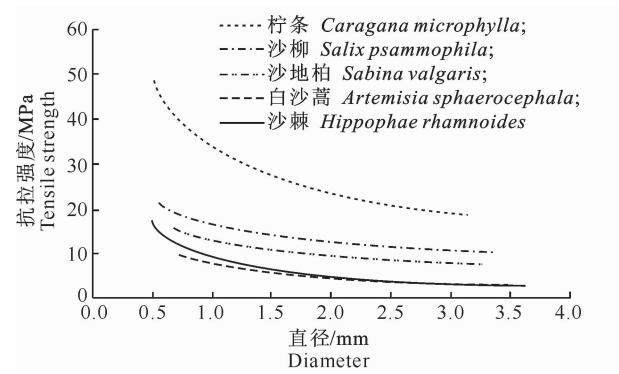


图 4 5 种植物鲃骨型侧根分支处的抗拉强度比较
Fig. 4 Comparison of tensile strength of herring bone type lateral root branch of the five plants

2.3.2 生长时期 从图 6 可以看出,柠条、沙柳和白沙蒿侧根分支处的抗拉强度表现为生长季初期大于生长旺盛期,沙地柏和沙棘侧根分支处抗拉强度表现为生长旺盛期大于生长季初期。

生长旺盛期柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿和沙棘侧根分支处抗拉强度的均值分别为 30.57,18.19,

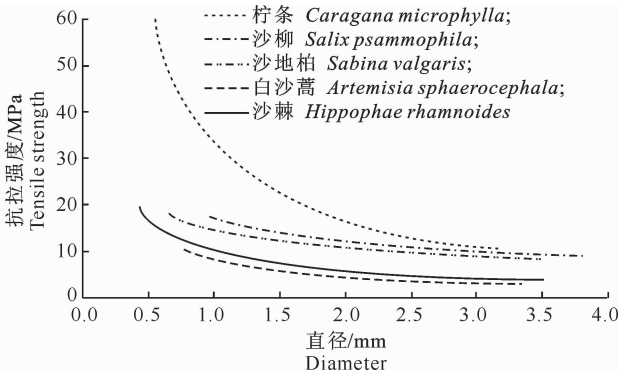


图 5 5 种植物二分枝型侧根分支处的抗拉强度比较
Fig. 5 Comparison of the tensile strength of two branching type lateral root branch of the five plants

9.52,8.54 和 5.34 MPa;生长季初期这 5 种植物侧根分支处抗拉强度的均值分别为 26.79,15.25,10.17,6.76 和 6.10 MPa。对这 5 种植物不同生长时期的抗拉强度进行差异显著性分析,结果表明,2 个生长时期 5 种植物侧根分支处抗拉强度均在 $\alpha=0.01$ 水平下差异性显著。

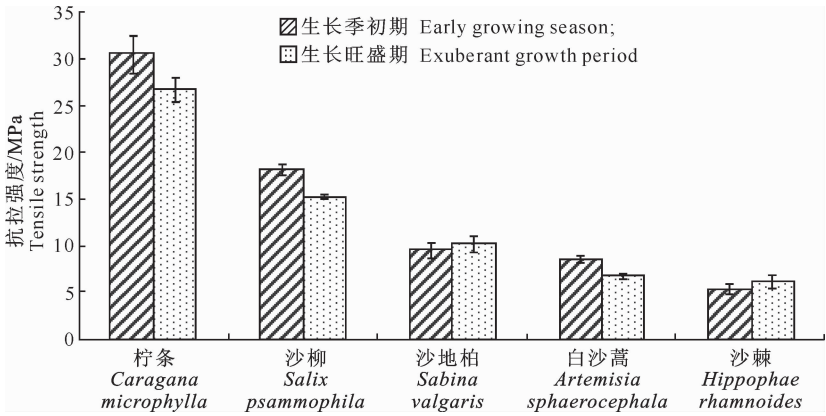


图 6 2 个生长时期 5 种植物侧根分支处抗拉强度的比较

Fig. 6 Comparison of the tensile strength at lateral root branches of the five plants at two growth periods

2.3.3 土壤含水量 从图 7 可以看出,柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿和沙棘侧根分支处的平均抗拉强度均表现为 0%土壤含水量下最大(其中 0%为模拟土

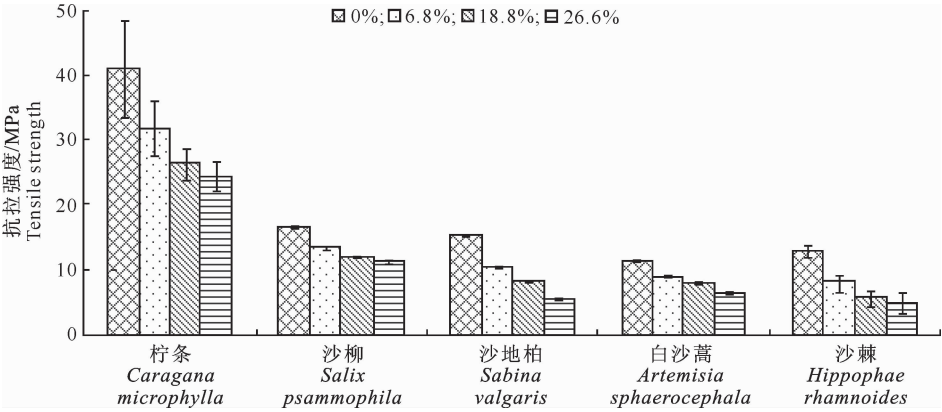


图 7 不同土壤含水量下 5 种植物侧根分支处抗拉强度的比较

Fig. 7 Comparison of tensile strength at lateral root branches of five plants under different soil moisture contents

柠条、沙柳、沙地柏、白沙蒿和沙棘在 0%土壤含水量下侧根分支处的抗拉强度均值分别为 40.95, 16.45, 15.05, 11.26 和 12.67 MPa;在 6.8%土壤含水量下分别为 31.81, 13.38, 10.37, 8.73 和 7.82 MPa;在 18.8%土壤含水量下分别为 26.20, 13.02, 7.90, 7.63 和 5.45 MPa;在 26.6%土壤含水量下分别为 24.39, 11.74, 5.31, 6.18 和 4.64 MPa。通过 SAS 9.0 软件分别对这 5 种植物不同土壤含水量下的抗拉强度进行差异显著性分析,结果表明,不同土壤含水量下 5 种植物侧根分支处抗拉强度均在 $\alpha = 0.01$ 水平下差异显著。

3 讨论

目前,由于受试验条件和诸多不确定因素的影响,绝大多数学者对根系的研究还停留在单根层面,并没有扩展到根系层面,如吕春娟等^[16]、王萍花

等^[17]对乔木根系抗拉力学特性、抗拉强度力学模型的研究,也只是解决了单根抗拉强度的模型问题,并没有解决整个根系的问题。因为根系是由各个径级的侧根分支处将直根连接构成的复杂的网络结构,假设直段根的抗拉力与相邻的侧根分支处的抗拉力相同,根系则以均衡的网络结构状态抵抗外力;如果直段根的抗拉力大于相邻的侧根分支处的抗拉力,在外力作用下整个根系将断裂成为无数单段的直根;如果直根的抗拉力小于相邻的侧根分支处的抗拉力,整个根系将成为无数分叉的根段。无论根系网络破坏是上述哪种类型,轴向拉力作用下根系的节点即侧根分支处,其抗拉力是正确评价待测植物根系抗拉力学特性的关键。

本试验中 5 种植物侧根分支处的抗拉力学特性均小于直根段的抗拉力学特性,说明根系在受拉过程中,往往是侧根分支处先于直根处断裂,导致整个

根系分裂为无数单段的直根,难以成为相互联结的根系网,这与陆桂红等^[18]对节节草、寒芒的的研究结果吻合,即节节草根系非节点处的抗拉力和抗拉强度均是节点处的 2 倍;同时也证实了牛国权^[19]的研究结果,即每种植物根系理论拉力值均大于该种植物的实际整株拉力。因此,目前普遍流行的用直段根的抗拉力学特性评价根系的固土护坡效应存在一定误差,还需考虑侧根分支处的抗拉力及抗拉强度的大小。

5 种植物抗拉力学特性差异显著,具体原因涉及到特定植物根系的生物学特性。正如黄艳辉等^[20]对木材单根纤维力学性质的研究所述,不同植物单纤维的纵向弹性模量、抗拉强度以及单纤维的蠕变、断裂、疲劳、扭转特性都是有差别的。再深入分析可能是因为柠条根系具有发达的次生韧皮部和木栓层^[21],其内部结构致密,受其他因素影响较小。而白沙蒿根系持水性较强,根系含水量较柠条高,根系内部细胞间隙较大,木质化程度低,结构相对松散,故受其他因素影响大,抗拉力相对较弱。表 1 为课题组对 5 种植物根系含水量的测试结果。

表 1 5 种植物根系的天然含水量

植物名称 Plant names	天然含水量/% Natural moisture
柠条 <i>Caragana microphylla</i>	10.46
沙柳 <i>Salix psammophila</i>	10.32
沙地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	22.24
白沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	36.23
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	42.46

侧根分支节点处的抗拉力随侧根分支处断面直径的增大而逐渐增加,这一力学特性与根系的解剖结构有关。根系在生长季初期,微细的纤维紧密排列,构成纤维细胞壁的网状骨架,根系的持续生长和木质化使木质素不断积存于微细纤维之间,以化学或物理方式使纤维之间黏结和加固^[22-23],增加根系的机械强度。随着侧根分支处直径的增粗,横截面积迅速增加,侧根分支处中的纤维和木质素在径向和轴向都会增加,细胞排列相对紧密,使分支处组织具有较好的抵抗变形的能力,抗拉力逐渐增加,从而表现为侧根分支处抗拉力随分支处直径的增大而增大。侧根分支处的直径越小,其抗拉强度越大,这种现象存在的主要原因与植物根系解剖结构组成的差异有关,需要进一步对其解剖结构的物理排列方式和根系细胞壁化学组成进行分析。从根系的解剖结构来看,活根的刚性和韧性与细胞壁有密切关系,供试的 5 种灌木根系纤维细胞狭长,其长径与根系纵

轴平行,由此使根系在顺纤维方向具有较强的抗拉性能,尤其是毛细根纤维具有较大弹性,表现出较大的抗拉强度^[24]。

4 结 论

1)植物根系节点处即侧根分支处为整个根系力学特性的薄弱点,5 种植物 2 种根型侧根分支处的抗拉力和抗拉强度均低于相邻直段根,其力学特性表现为柠条最优,白沙蒿、沙地柏和沙棘较弱。

2)植物根系的生长时期和根系所在土壤的含水量对侧根分支处的抗拉强度均影响显著。由于植物的个体差异,单根的生理结构也存在不同,柠条、沙柳和白沙蒿侧根分支处的抗拉强度在生长季初期表现良好,而沙地柏和沙棘侧根分支处在生长旺盛期表现良好。虽然植物种间表现出个体差异,但是,在土壤含水量控制试验中反映出的规律是一致的,抗拉强度均随含水量的增加而降低。

[参考文献]

[1] 张欣,姚喜军,刘静,等.土壤孔隙水承压条件下 4 种根-土复合体抗剪特性[J].水土保持通报,2010,30(4):22-26.
Zhang X, Yao X J, Liu J, et al. Shear strength characteristics of root-soil composites under bearing pressure condition of soil pore water[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4): 22-26. (in Chinese)

[2] 张超波,陈丽华,刘秀萍.黄土高原刺槐根系固土的力学增强效应评价[J].水土保持学报,2009,23(2):57-60.
Zhang C B, Chen L H, Liu X P. Triaxial compression test of loess-root composites to evaluate mechanical effect of roots on reinforcing soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 57-60. (in Chinese)

[3] 黄晓乐,许文年,夏振尧.植被混凝土基材 2 种草本植物根-土复合体直剪试验研究[J].水土保持研究,2010,17(4):158-165.
Huang X L, Xu W N, Xia Z Y. Direct shear test of root-soil composite system by two representative herb plants in vegetation-growing concrete base material[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(4): 158-165. (in Chinese)

[4] 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): 207-226.

[5] 刘跃明,张云伟,周跃.侧根的根土粘合键模型及牵引效应测试系统[J].南京林业大学学报:自然科学版,2003,27(1):50-54.
Liu Y M, Zhang Y W, Zhou Y. A model of frictional root-soil bond between lateral root and soil and the test on traction effect[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2003, 27(1): 50-54. (in Chinese)

- [6] Joanne E N. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in southern England [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1): 43-53.
- [7] 周 跃, 张 军, 林锦屏. 西南地区松属侧根的强度特征对其防护林固土护坡作用的影响 [J]. 生态学杂志, 2002, 21(6): 1-4.
Zhou Y, Zhang J, Lin J P. Strength characteristics of lateral roots of pine trees and its significance in slope stability of pine shelter-forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(6): 1-4. (in Chinese)
- [8] 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 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 62-65.
Song W F, Chen L H, Liu X P. Experiment on characteristic of interface between root system and soil [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 62-65. (in Chinese)
- [9] 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 [J]. 摩擦学学报, 2010, 30(1): 87-91.
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* [J]. Tribology, 2010, 30(1): 87-91. (in Chinese)
- [10] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究 [J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(2): 31-38.
Yang Y C, Mo Y J, Wang Z F, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite [J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(2): 31-38. (in Chinese)
- [11] 刘国彬, 蒋定生, 朱显漠. 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.
Liu G B, Jiang D S, Zhu X M. Study on grasses root bio-mechanics in loess plateau [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1996, 2(3): 21-28. (in Chinese)
- [12] 宋维峰, 陈丽华, 刘秀萍. 林木根系固土作用数值分析 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 80-84.
Song W F, Chen L H, Liu X P. Numerical analysis on the effects of forest root system on soil reinforcement [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(2): 80-84. (in Chinese)
- [13] 杨永红, 刘淑珍, 王成华, 等. 含根量与土壤抗剪强度增加值关系的试验研究 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 287-291.
Yang Y H, Liu S Z, Wang C H, et al. Experimental research on the relation between increasing value of shearing strength with root system [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 287-291. (in Chinese)
- [14] 蒋坤云, 陈丽华, 杨苑君, 等. 华北油松、落叶松根系抗拉强度与其微观结构的相关性研究 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 8-12.
Jiang K Y, Chen L H, Yang Y J, et al. Relationship between tensile strength and selected anatomical features of two different conifer species' roots in north China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 8-12. (in Chinese)
- [15] 苑淑娟, 牛国权, 刘 静, 等. 瞬时拉力下两个生长期 4 种植物单根抗拉力与抗拉强度的研究 [J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 22-26.
Yuan S J, Niu G Q, Liu J, et al. Instantaneous anti-tension and tensile strength of single root of four plant species in two growth periods [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(5): 22-26. (in Chinese)
- [16] 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.
Lü C J, Chen L H, Zhou S, et al. Root mechanical characteristics of different tree species [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 329-335. (in Chinese)
- [17] 王萍花, 陈丽华, 冀晓东, 等. 华北地区 4 种常见乔木根系抗拉强度的力学综合模型 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(1): 39-45.
Wang P H, Chen L H, Ji X D, et al. Establishing an integrated mechanical model of root tensile strength taking four common arbor species in north China for example [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(1): 39-45. (in Chinese)
- [18] 陆桂红, 欧国强, 杨 顺, 等. 泥石流源区典型草本植物根系抗拉试验 [J]. 山地学报, 2014, 32(6): 725-731.
Lu G H, Ou G Q, Yang S, et al. Root tensile test of typical grass in debris flow triggering are [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 32(6): 725-731. (in Chinese)
- [19] 牛国权. 基于力学特性的根系固土抗裂有效性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
Niu G Q. Effectiveness of anti-crack and soil reinforcement by roots based on roots mechanics [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2010. (in Chinese)
- [20] 黄艳辉, 费本华, 赵荣军, 等. 木材单根纤维力学性质研究进展 [J]. 林业科学, 2010, 46(3): 146-152.
Huang Y H, Fei B H, Zhao R J, et al. Advance on mechanics properties of wood single fiber [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(3): 146-152. (in Chinese)
- [21] Robinson D, Hodge A H. Constraints on the form and function of root systems [J]. Root Ecology, 2003, 168: 1-31.
- [22] Massai R, Remorini D, Tattini M. Gas exchange water relations and osmotic adjustment in two scion/rootstock combinations of *Prunus* under various salinity concentrations [J]. Plant Soil, 2004(259): 153-162.
- [23] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 40-46.
Zhu H L, Hu X S, Mao X Q, et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 40-46. (in Chinese)
- [24] 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(2): 3445-3452.
Zhu H L, Hu X S, Mao X Q, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 3445-3452. (in Chinese)