

半干旱地区 3 种植物根系的抗弯力特征

格日乐¹, 刘艳琦¹, 孙保平², 阿如旱¹, 娜日苏³

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 北京林业大学
水土保持学院, 北京 100083; 3. 内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: [目的] 研究内蒙古中西部 3 种典型水土保持植物柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的根节点与相邻直根在不同直径下抗弯力和抗弯强度,为植物根系网络固土内在机理的研究提供科学依据。[方法] 通过悬臂梁弯曲试验的方法,对 3 种植物的根节点与相邻直根进行抗弯试验。[结果] 在测试根径 1~5 mm 范围内,3 种植物根节点和相邻直根的抗弯力与直径均呈幂函数正相关,3 种植物根节点和相邻上级直根平均抗弯力的种间大小顺序一致,为柠条>紫花苜蓿>沙棘。在测试根径 2~5 mm 范围内 3 种植物根节点的平均抗弯强度均小于各自相邻上级直根的平均抗弯强度,且种间大小顺序为柠条(21.87, 24.33 MPa)>紫花苜蓿(10.69, 17.02 MPa)>沙棘(4.81, 4.95 MPa)。[结论] 3 种植物中柠条根系抵抗弯曲变形的能力最大。沙棘根节点与其相邻直根抗弯强度差值最小,其各级根系间共同作用抵抗变形的能力最好,有利于根系网中各级根系间的固结,更加有助于根系网发挥其固持土体的作用。

关键词: 相邻上级直根; 根节点; 抗弯力; 抗弯强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0112-06

中图分类号: S714.7

文献参数: 格日乐, 刘艳琦, 孙保平, 等. 半干旱地区 3 种植物根系的抗弯力特征[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 112-117. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.018. Ge Rile, Liu Yanqi, Sun Baoping, et al. Characteristics of root bending resistance of three plants in semi-arid area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 112-117.

Characteristics of Root Bending Resistance of Three Plants in Semi-arid Area

GE Rile¹, LIU Yanqi¹, SUN Baoping², ARU Han¹, NA Risu³

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. College of Grassland Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: [Objective] To study the adjacent tap root and root nodes of typical soil and water conservation plants *Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides* and *Medicago sativa* in the different diameters of bending resistance and bending strength in Midwestern Inner Mongolia, in order to provide a scientific basis for the study of the inner mechanism of the plant root network. [Methods] Using bending test of cantilever beam, the tap root and root nodes of three kinds of plants was investigated. [Results] In the test root diameter range of 1~5 mm, the bending resistance of three plant root nodes and adjacent tap roots were positively correlated with the diameters, and the of three plant root nodes and adjacent superior tap root was ranked as: *C. korshinskii* > *M. sativa* > *H. rhamnoides*. In the test root diameter range of 2~5 mm, the root node bending force of three plants was smaller than their adjacent superior tap root, and ranked as: *C. korshinskii* (21.87, 24.33 MPa) > *M. sativa* (10.69, 17.02 MPa) > *H. rhamnoides* (4.81, 4.95 MPa). [Conclusion] The capacity of the *C. korshinskii* root system to resist bending deformation is the best among three plants. The least bending strength differences have been found between *H. rhamnoides* root nodes and adjacent tap roots, indicating that the bending resistance of *H. rhamnoides* root system is the best at all levels, which is beneficial to the consolidation of root systems.

Keywords: adjacent superior tap root; root node; bending force; bending strength

收稿日期: 2017-09-15

修回日期: 2017-12-01

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); 内蒙古自然科学基金资助项目“沙结皮防风抗蚀的力学特性”(2017MS0407)

第一作者: 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研究。E-mail: gerile197081@126.com.

通讯作者: 刘艳琦(1993—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 1370023278@qq.com.

植物固土主要通过根系固土来实现^[1]。目前对根系固土力学原理的研究主要集中在根—土界面摩阻特性、根—土复合体抗剪特性、根系抗拉特性等,其中的一些研究成果现已作为评价根系固持土体能力的重要依据^[2-11]。当植物生长在边坡条件下,会受到多种应力的作用,植株在受到风力作用时,其迎风面的根系主要表现为抗拉特性,而背风面根系则表现为抗弯特性^[12]。与之相似的是,植物在重力作用下,上坡向根系表现为抗拉特性,下坡向根系表现为抗弯特性。

植物抗弯力学特性的研究分为地上部分和地下部分,研究大部分停留在地上部分,主要以抗倒伏作物^[13-14]的选育和收割机械设计^[15-18]为目的,此类研究的重点是枝条或茎的抗弯折特性。还有研究者探讨了可作为木材加工林木的抗弯特性^[19-20]。而针对水土保持植物根系抗弯力学特性的研究才刚刚开始。弯曲力学特性的研究方法主要有三点弯曲法^[21-25]、四点弯曲法^[26-28]、悬臂梁弯曲法^[29-30]和灰色关联法^[31]等。不同研究对象(农作物)抗弯试验研究方法也为水土保持植物根系抗弯特性研究工作的开展提供了经验和启示。

另外,植物枝叶承受的外力通过根颈向各级根系传递的过程中,根节点是构成根系网并传递外力的关键部位。根系在受力过程中,若根节点处首先断裂,则整个根系将成为若干单根,无法构成相互联结的根系网络。然而以往对根节点重要性认识不足,以及试验条件的制约,国内外关于根节点处力学特性的研究甚少。植物根系的生长并不是以单根形式存在,而是以一个交织形态存在的复杂网状结构,因此根节点处对土体起到的锚固作用同样不可忽视。根节点在主根与侧根之间起着纽带作用,对其力学特性的研究将很好地解释植物根系网络固土的内在机理。

鉴于此,本文拟通过室内伺服式强力机进行试验,通过悬臂梁弯曲方法^[32]研究柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)3种植物根节点与其相邻直根在不同直径下抗弯力和抗弯强度,为植物根系网络固土内在机理的研究提供科学依据,也为完善干旱半干旱区植物根系固土抗蚀生物力学数据库,进而为该区域及相似地区植被建设中物种的选择及配置提供生物力学方面的依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料

供试植物为3~4龄柠条、沙棘和紫花苜蓿,3种

植物根系都与根瘤菌共生,具有固氮改土作用。其中柠条(豆科 Leguminosae、锦鸡儿属 *Caragana*)是黄土高原地区主要的旱生落叶灌木,根系发达,具有广泛的适应性和很强的抗逆能力,沙棘(胡颓子科 Elaeagnaceae、沙棘属 *Hippophae*)落叶灌木或小乔木,具有较强的适应能力,能在高温、低温、干旱、瘠薄、盐碱、风沙等恶劣环境中生存,2种灌木均为营造水土保持林和防风固沙林、饲料林和薪炭林的优良树种;紫花苜蓿为豆科(Leguminosae)多年生草本植物,抗逆性强,有较强固土能力。3种植物根系材料采集于半干旱气候区的内蒙古黄土丘陵沟壑区的鄂尔多斯市准格尔煤田黑岱沟露天煤矿再塑地貌—内排土场平台,平台样地海拔高度为1255 m,中心经纬度为39°47'15"N,111°16'07"E,土壤质地为轻壤土。沙棘和柠条2种灌木为植苗造林,株行距为1.5 m×1.5 m,草本植物紫花苜蓿为直播,条播,条播行距30 cm,盖度为50%,造林时期为春季造林。于2014年生长季末期的8月末采集3种植物标准株的根系。标准株的选取是在相同立地条件下对每一种植物随机抽取3~4年生植株30株作为1个样本,测量其地径、株高及冠幅,重复3次。3种植物生长状况见表1。在30株样本中找出与平均值最接近的3株植物作为标准株,对标准株进行根系挖掘取样。以标准株基径为圆心,以1 m为半径绕树一圈挖1 m深的圆柱形剖面。根系的挖掘采用收缩法,即由外逐渐向内挖,同时采集试验所需径级根系,挖掘过程中尽量减少对根系的破坏。挖出的根系装在黑色塑料袋内且用湿沙覆盖,最后带回实验室内置于4℃恒温箱内保持根系的湿度,尽快完成试验。

1.2 研究方法

1.2.1 试验根的制备 相邻上级直根试样:每种植物选取根径1~5 mm的根,并以0.5 mm为一个间隔进行分级,不同径级组分别取20根左右做重复试验。试验根长度不小于60 mm(图1),选取试验部分(D_1-D_3)长30 mm,并在试验根一端贴上标签写明序号。分别对这3个部位进行标记和直径的测量,每个点正交方向测量2次,然后取各个点平均值作为该试验根的直径。

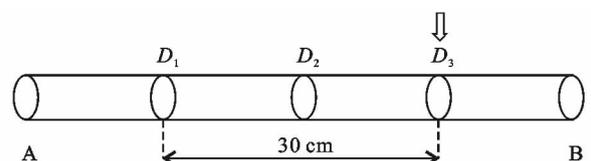


图1 相邻直根示意图

表 1 植株生长状况及标准株选取

植物种	造林方式	株数	株高/cm	冠幅/cm		地径/mm	
				东西	南北		
柠条	育苗	30	均值	105.45±13.21	76.03±8.02	78.10±9.21	6.11±1.21
			离差	0.14	0.14	0.15	0.24
沙棘	育苗	30	均值	98.36±12.28	84.22±14.24	86.12±12.15	11.12±2.11
			离差	0.24	0.28	0.26	0.21
紫花苜蓿	播种	30	均值	44.17±5.79	52.27±12.72	51.43±8.11	3.15±0.39
			离差	0.23	0.24	0.21	0.15

含根节点根段:每种植物选取含根节点根段分叉处直径在 2~5 mm 且仅具有一个分叉处的根为试验根,同样以 0.5 mm 为一个间隔进行分级,不同径级组分别取 15 根左右做重复试验。试验根长度不小于 60 mm(按分叉前根轴线的延长线量取),试验部分(D_1-D_3)30 mm,根节点处位于试验部分中间 D_2 (如图 2)。直径测量方法与上述直根段相同。

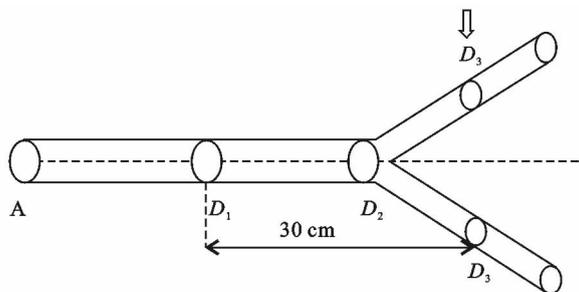


图 2 含根节点根段示意图

1.2.2 研究方法 本试验采用悬臂梁弯曲试验法模拟土体变形时根系抵抗弯曲的能力,试验过程中根的一端固持在土体中,固持端下面的根系随着土体的错动而弯曲变形。

抗弯力的测定采用 YG(B)026 H-250 型织物强力机(精度为 0.01,拉力量程为 0~2 500 N),以及自制变口径钢制夹具。

具体方法如图 1 和图 2 所示,固定点位于 D_1 ,施力点位于夹点后 3 cm 处,即 D_3 ,压头位于施力点上方,与试验根垂直。当压头接触到试验根后仪器自动采集数据,当力达到峰值后自动停止。若试验过程中根夹口处出现断裂的情况,应将其视为无效数据。抗弯强度计算公式^[32]如下:

$$\sigma = \frac{32F_1L}{\pi D^3}$$

式中: L ——力臂长(mm); F_1 ——抗弯力(N); D ——根的直径(mm)。

根节点抗弯力计算,其中 L 为从 $D_1 D_2$ 水平延长线(分叉前根轴线的延长线)开始至施力点 D_3 垂直延长线的交点处长度 $D_1 D_3$ (见图 2)。

2 结果与分析

2.1 3 种植物根节点与相邻直根抗弯力比较

如图 3 所示,3 种植物根节点和相邻上一级直根的抗弯力均随着直径的增大而增大,抗弯力与直径符合幂函数正相关关系。

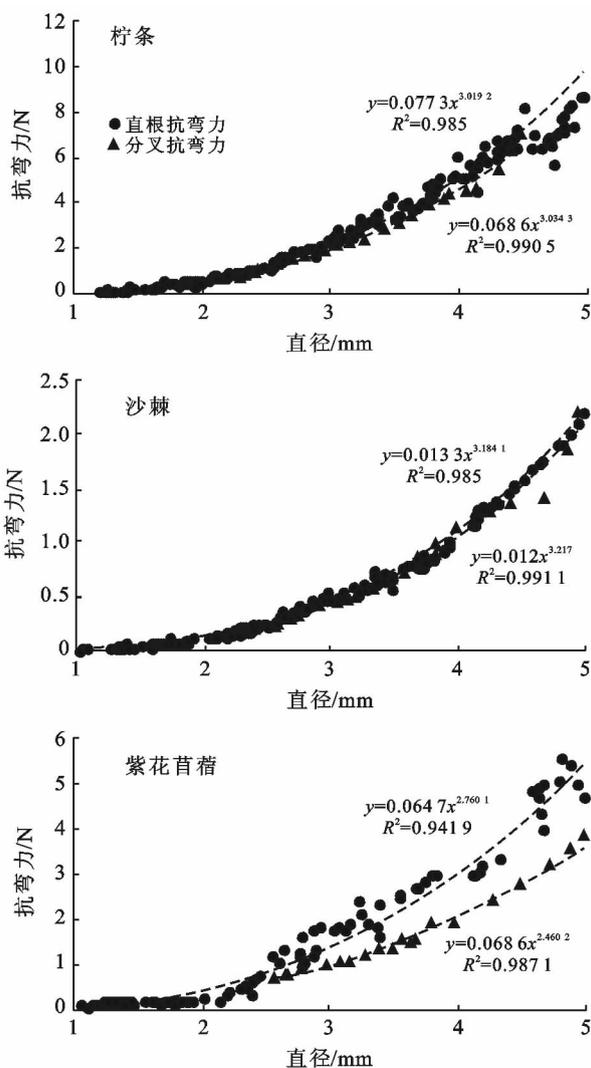


图 3 3 种植物根节点与相邻直根抗弯力(N)随直径变化关系

将所测植物所有径级内的直根和分叉根进行差异性检验,结果显示紫花苜蓿 $p = 0.3980$,沙棘 $p =$

0.060 9, 柠条 $p=0.939 3$, 表明3种植物根节点与其相邻直根的抗弯力无显著性差异($p>0.05$)。

对每种植物2~5 mm径级内的根节点根与相邻上一级直根抗弯力数据进行分径级差异性检验,即分别将每种植物、每一径级含根节点根与相邻上级直根抗弯力的试验数据作为样本,进行差异性检验,结果显示3种植物根节点与相邻上级直根之间抗弯力只有部分径级间存在差异,集中于2~3.5 mm径级之间($\alpha=0.05$ 水平下差异显著)(表2)。3种植物在其他径级范围内的根节点与相邻上级直根的抗弯力在 $\alpha=0.05$ 水平下无显著性差异。

表2 根节点与相邻直根抗弯力(N)的差异性检验

植物种	直径/mm	DF	F	P	相邻直根	含根节点根段
柠条	2~2.5	1	9.61	0.036 3	b	a
	2.5~3	1	12.40	0.024 4	b	a
	3~3.5	1	13.19	0.022 1	b	a
沙棘	2~2.5	1	9.38	0.037 6	b	a
	2.5~3	1	8.65	0.042 4	b	a
	3~3.5	1	8.65	0.042 4	b	a
紫花苜蓿	2.5~3	1	18.78	0.012 3	b	a
	3~3.5	1	14.75	0.018 4	b	a

注:同种植物、相同径级间,不同字母标记的为差异显著($\alpha=0.05$),相同字母标记的为差异不显著。

当柠条、沙棘、紫花苜蓿上级直根直径分别从1.19 mm增大到4.97 mm,从1.05 mm增大到4.98 mm,1.10 mm增大到4.98 mm的过程中,所对应的抗弯力变化范围为0.11~8.68,0.01~2.20,0.10~5.54 N。柠条、沙棘、紫花苜蓿含根节点根直径分别从2.12增大到4.49 mm、从2.40 mm增大到4.94 mm,从2.58 mm增大到4.98 mm的过程中,所对应的抗弯力变化范围为0.66~6.97,0.20~2.21,0.75~3.84 N。

表3结果显示,随着径级的增大,柠条和沙棘根节点相比各自相邻上级直根抗弯力的增长率在逐渐减小,紫花苜蓿根节点相比其相邻上级直根抗弯力的增长率在逐渐增大。

将2和5 mm分别带入到各自的回归方程中计算出相对应的抗弯力值,通过公式 $[(F_{末}-F_{初})/F_{初}]$ 计算3种植物根节点和相邻上级直根抗弯力的增幅以便于进行定量分析,所得柠条根节点和相邻上级直根抗弯力增幅分别为17%和15%;沙棘根节点和相邻上级直根抗弯力增幅分别为20%和18%;紫花苜蓿根节点和相邻上级直根抗弯力增幅分别为10%和

13%。表明沙棘根系抗弯力增幅大于其他3种植物。3种植物根节点和相邻上级直根平均抗弯力的种间大小顺序为:柠条>紫花苜蓿>沙棘。

表3 3种植物根节点与相邻直根在相同径级下抗弯力的增长率 %

直径/mm	%		
	柠条 (侧一直)/直	沙棘 (侧一直)/直	紫花苜蓿 (侧一直)/直
2	-10.3	-7.7	-13.9
3	-9.8	-6.5	-23.7
4	-9.4	-5.6	-30.0
5	-9.1	-4.9	-34.6

3种植物根节点抗弯力均小于相邻上级直根,柠条根节点抗弯力为相邻直根抗弯力的91%,沙棘根节点抗弯力为相邻上级直根抗弯力的95%,紫花苜蓿根节点抗弯力为相邻上级直根抗弯力65%。表明沙棘根节点抵抗土体弯曲变形的能力与相邻直根抵抗土体弯曲变形的能力相差最小,其次为柠条,紫花苜蓿相差最大,也就是说,3种植物根系相比较,沙棘各级根系间共同作用抵抗变形的能力较好,其次为柠条,各级根系间较好共同作用有利于根系网中各级根系间的固结,有助于根系网发挥其固持土体的作用。紫花苜蓿根节点与其相邻上级直根抵抗弯曲变形的能力相差较大,所以在外力作用下,根节点较易发生断裂。

2.2 3种植物根节点与相邻直根抗弯强度比较

对于每种植物,分别将2~5 mm径级的根节点、相邻直根抗弯强度的试验数据作为样本,进行根节点与相邻直根抗弯强度的差异性检验,结果表明柠条、沙棘和紫花苜蓿根节点与相邻直根之间的抗弯强度均在 $\alpha=0.05$ 水平下差异性显著(表4)。

表4 3种植物根节点与相邻直根抗弯强度(MPa)的差异性检验表

植物种	DF	F	P	相邻直根	根节点
柠条	1	26.94	0.000 8	B	A
沙棘	1	5.16	0.046 5	B	A
紫花苜蓿	1	18.71	0.002 5	B	A

注:每种植物,有不同字母标记的为差异显著($\alpha=0.05$),有相同字母标记的为差异不显著。

3种植物根节点和相邻直根的抗弯强度随着直径的增大无明显变化规律。图4为3种植物根径在2~5 mm范围根节点与相邻上级直根平均抗弯强度随直径的变化趋势。

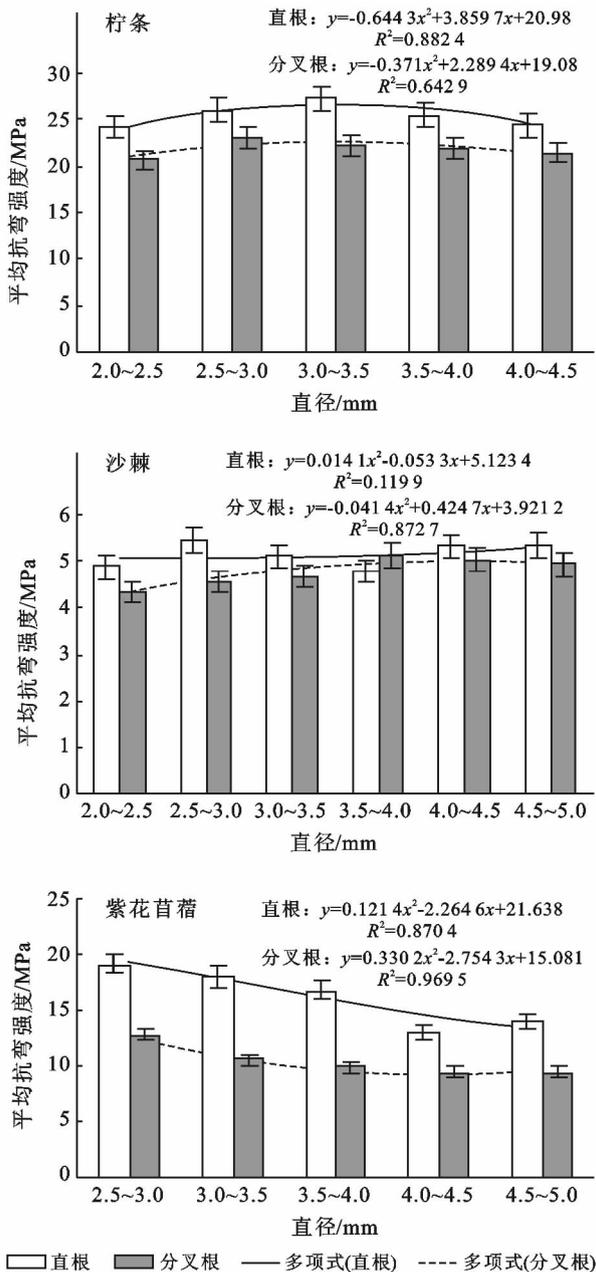


图 4 3 种植物根节点与相邻直根抗弯强度(MPa)比较

由图 4 可知,所测根径范围内除了沙棘直根的平均抗弯强度随着根径的增加无明显变化规律以外,其他直根与根节点平均抗弯强度随着根径的增加呈现多项式函数关系,其中柠条根节点和相邻上级直根在 2.5~3 和 3~3.5 mm 径级范围时抗弯强度达到最大,沙棘根节点和相邻上级直根分别在 3.5~4 和 2.5~3 mm 径级范围时抗弯强度达到最大,紫花苜蓿根节点和相邻直根均在 2.5~3 mm 径级范围时抗弯强度达到最大。柠条、沙棘和紫花苜蓿根节点抗弯强度波动范围分别是(17.80~24.86, 4.19~5.58, 9.44~13.35 MPa);各自相邻上级直根抗弯强度波动范围分别是(16.32~30.86, 4.01~6.29, 6.95~23.04

MPa)。并且 3 种植物根节点的平均抗弯强度均小于各自相邻上级直根的平均抗弯强度,种间大小为柠条(21.87, 24.33 MPa) > 紫花苜蓿(10.69, 17.02 MPa) > 沙棘(4.81, 4.95 MPa)。柠条、沙棘和紫花苜蓿相邻上级直根平均抗弯强度为其根节点平均抗弯强度的 1.11, 1.03 和 1.59 倍。

3 讨论

前期研究表明^[33],柠条、沙棘和紫花苜蓿单根极限抗拉强度随着纤维素含量的增加而增大,单根极限抗拉强度即单位面积上的抗拉力与纤维素含量相关系数分别为沙棘 0.99, 柠条 0.83, 紫花苜蓿 0.80,说明纤维素含量对植物根系抗拉强度具有重要影响。柠条、沙棘和紫花苜蓿根节点和相邻上级直根的抗弯力与直径呈正相关幂函数关系,3 种植物根节点和相邻上一级直根的抗弯强度随着直径的增大无明显变化规律。其内在机理还需要结合根系微观形态构造及其化学组分等进行进一步研究。

3 种植物根节点平均抗弯强度均小于各自相邻直根的平均抗弯强度,种间大小顺序为:柠条(21.87, 24.33 MPa) > 紫花苜蓿(10.69, 17.02 MPa) > 沙棘(4.81, 4.95 MPa)。关于这点需要结合同一植物种根节点与其相邻直根段的微观形态构造进行后续深入研究,而造成植物种间差异的原因是多方面的,首先,不同树种具有不同的生物学特性,即微观形态构造及其化学组分不同。其次,不同树种生物生态特征的形成和发展除了受自身生物学特性即遗传因素的影响外还与立地条件密切相关,故使得生物力学特性也不同。

4 结论

(1) 在测试根径 1~5 mm 范围内,3 种植物根节点和相邻上级直根的抗弯力与直径呈幂函数正相关关系,且 3 种植物根节点抗弯力与其相邻直根的值在 0.05 水平无显著性差异。3 种植物根节点和相邻上级直根平均抗弯力的种间大小顺序一致,为柠条 > 紫花苜蓿 > 沙棘。在测试根径 2~5 mm 范围内 3 种植物根节点的平均抗弯强度均小于各自相邻上级直根的平均抗弯强度,种间大小顺序为柠条(21.87, 24.33 MPa) > 紫花苜蓿(10.69, 17.02 MPa) > 沙棘(4.81, 4.95 MPa),与平均抗弯力的大小顺序一致。说明 3 种植物间相比较,柠条根系抵抗弯曲变形的能力最大,沙棘最小,紫花苜蓿介于二者之间。

(2) 沙棘直根段与根节点抗弯力、抗弯强度差值最小,表明沙棘根节点抵抗土体弯曲变形的能力与相

邻直根抵抗土体弯曲变形的能力相差最小,各级根系间共同作用抵抗变形的能力较好,有利于根系网中各级根系间的固结,更加有助于根系网发挥其固持土体的作用。紫花苜蓿根节点与其相邻直根抵抗弯曲变形的能力相差较大,在外力作用下,含根节点根段较易发生断裂,柠条则介于二者之间。该研究结果可为内蒙古砧砂岩丘陵沟壑区沙棘柔性坝材料的选择提供生物力学依据。

[参 考 文 献]

- [1] 杨永红. 东川砾石土地区植被固土护坡机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2006.
- [2] 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):21-25.
- [3] 邢会文,刘静. 柠条、沙柳根与土及土与土界面摩擦特性[J]. 摩擦学报,2010,30(10):87-91.
- [4] 王云翔,孙海龙,罗龙皂,等. 人工石质边坡构树根系抗剪特性研究[J]. 水土保持研究,2012,19(3):114-118.
- [5] 胡宁,刘静,张永亮,等. 含水率对2种沙土根-土复合体残余强度的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(12):337-340.
- [6] Comino E, Druetta A. The effect of poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment[J]. Soil and Tillage Research, 2010,106(2):194-201.
- [7] Ali F H, Osman N. Shear strength of a soil containing vegetation roots[J]. Soil and Foundations, 2008,48(4):587-596.
- [8] Loades K W, Bengough A G. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils[J]. Ecological Engineering, 2010,36(3):276-284.
- [9] 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试验研究[J]. 水土保持研究,2007,14(1):138-140.
- [10] Mattie C, Bischetti G B. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species[J]. Plant and Soil, 2005,278:23-32.
- [11] 田佳,刘耀辉. 华北地区几种常用边坡绿化植物的根系力学特性研究[J]. 中国水土保持,2007(10):34-36.
- [12] Crook M J, Ennos A R. The anchorage mechanics of deep rooted larch, *Larix europaea* L. *japonica* [J]. Journal of Experimental Botany, 1996,47(303):1509-1517.
- [13] 梁莉,郭玉明. 作物茎秆生物力学性质与形态特性相关性研究[J]. 农业工程学报,2008,24(7):1-6.
- [14] 袁红梅,郭玉明,李红波. 小麦茎秆弯折力学性能的试验研究[J]. 山西农业大学学报:自然科学版,2005,25(2):173-176.
- [15] 赵春花,曹致中. 豆禾牧草刈割期茎秆抗弯特性试验研究[J]. 草原与草坪,2010,30(1):20-23.
- [16] 薛运凤,曹望成. 茶树新梢的弯曲力学特性[J]. 浙江农业大学学报,1994,20(1):43-48.
- [17] 刘庆庭,区颖刚,袁纳新. 甘蔗茎在弯曲荷载下的破坏[J]. 农业工程学报,2004,20(3):6-9.
- [18] Ince A, Ugurluay S, Guzel E, et al. Bending and shearing characteristics of sunflower stalk residue[J]. Biosystems Engineering, 2005,92(2):175-181.
- [19] 王淑娟,李黎,鹿振友,等. 五种白桦木材的抗弯强度和抗弯弹性模量的研究[J]. 中国林业,2001(9):28-29.
- [20] 徐曼琼,鹿振友,李黎,等. 火炬松木材的抗弯弹性模量和抗弯强度的变异[J]. 北京林业大学学报,2001,23(4):56-59.
- [21] 刘庆庭,区颖刚,袁纳新. 甘蔗茎在弯曲荷载下的破坏[J]. 农业工程学报,2004,20(3):6-9.
- [22] 蔡中全. 水稻茎秆抗折力及其相关性状研究[D]. 南宁:广西大学,2008.
- [23] 赵春花,曹致中. 豆禾牧草刈割期茎秆抗弯特性试验研究[J]. 草原与草坪,2010,30(1):20-23.
- [24] 李仕途,罗燕,宋成良,等. 玉米茎秆节间抗折强度分析[C]. 北京:北京力学学会学术年会,2011.
- [25] 刘瑛,高甲荣,顾岚. 基于植物柔韧性的土壤生物工程护岸材料选择[J]. 北京林业大学学报,2013,35(6):74-79.
- [26] 胡婷,焦群英,付志一,等. 小麦茎秆的抗弯复合材料力学模型[J]. 应用力学学报,2007,24(2):279-283.
- [27] 莫永生,蔡中全,杨亲琼,等. 高大韧稻茎秆的抗折力研究[J]. 中国农学通报,2008,24(2):193-198.
- [28] 张明聪. 养分管理对寒地水稻抗倒伏性能和产量的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2010.
- [29] 朱艳姝,朱大洲,朱石沙,等. 小麦茎秆机械强度的力学评价研究[J]. 农机化研究,2012,34(9):17-23.
- [30] 勾玲,赵明,黄建军,等. 玉米茎秆弯曲性能与抗倒能力的研究[J]. 作物学报,2008,34(4):653-661.
- [31] 郭玉明,袁红梅,阴妍,等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. 农业工程学报,2007,23(7):14-18.
- [32] 刘玥. 4种植物直段根和侧根分支处抗弯力学特性的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [33] 格日乐,乌仁图雅,左志严,等. 4种植物枝条与根系生物力学特性及其影响因素研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2015,36(1):46-54.