

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

刘 玥¹, 刘 静¹, 张 格², 张 欣³, 赵 英 铭²

(1. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200; 3. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要:以 3~4 年生柠条和沙棘根为研究对象, 采用悬臂梁试验对同径级的直段根和侧根分支处进行弯曲试验。结果表明: 2 种植物同径级直段根和侧根分支处抗弯力与直径均呈幂函数正相关关系, 而抗弯强度随直径变化无明显规律, 在均值左右波动; 多数径级范围, 同种植物间平均抗弯力和平均抗弯强度均表现为直根段大于侧根分支处; 相同径级时, 当直根段和侧根分支处直径 > 2.5 mm 时, 2 种植物直段根和侧根分支处抗弯力和抗弯强度的种间比较均表现为柠条 $>$ 沙棘; 柠条直段根抗弯强度约为沙棘直段根抗弯强度的 1.12 倍, 柠条侧根分支处抗弯强度约为沙棘侧根分支处抗弯强度的 1.04 倍。

关键词:柠条; 沙棘; 抗弯力; 抗弯强度; 直根; 侧根

中图分类号:S 157.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2014)19-0016-04

植物根系除了参与土壤中物质循环和能量流动两大生态过程, 其盘根错节的分布形式在支撑植物体和固持土体方面有着至关重要的作用。根系在提高土体抵抗变形的能力、增强边坡稳定性方面的作用已被大家广泛认可, 并已大量运用于工程实践当中^[1-3]。在根系固土力学机制的研究领域, 根-土复合体抗剪特性、根-土界面摩阻特性、单根抗拉特性等已成为评价根系固持土体能力的重要指标^[4-6]。国内外学者关于植物根系提高土体抗剪切强度作用方面已取得较多研究成果。Comino 等^[7]和 Ali 等^[8]分别以 *Festuca pratensis* 和 *Vetiveria zizanioides* 的根系为研究对象, 通过剪切试验比较得出含根土的抗剪强度明显高于无根土的抗剪强度, 陈昌富^[9]、胡宁等^[10]对植物根加筋土进行剪切试验后得出相似的结果。在根的抗拉力学特性方面的研究也取得了许多成果, 众多学者都得出单根抗拉力随根径增大而增大, 抗拉强度随根径增大而减小的结论^[11-12]。但对于某些植物来说, 抗拉强度与根径却呈正相关关系^[13-14]。该课题组成员刘晓敏^[15]针对柠条 (*Caragana intermedia*

Kuang et H. C. Fu)、沙柳 (*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang)、沙地柏 (*Sabina vulgaris* Ant.)、白沙蒿 (*Artemisia sphaerocephala* Krasch.) 和沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.) 侧根分支处和相邻直段根的抗拉力学性质的差异进行了研究, 得出 5 种植物侧根分支处的抗拉力和抗拉强度普遍低于相邻直段根的抗拉力和抗拉强度。但是, 在土体发生位移特别是错动时, 根不仅承受拉力和剪力, 还会承受弯曲力的破坏。然而, 植物单根抗弯特性的研究至今尚鲜见报道。该试验以 3~4 年生的柠条、沙棘为研究对象, 通过悬臂梁试验研究同径级直段根和侧根分支处的抗弯力学性质, 以期进一步阐明植物根系的固土机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料针对标准株进行, 于 2013 年 8 月中旬选择长势良好、分布均匀的 3~4 年生柠条和沙棘样地, 每种植物随机抽取 20 株分别测量其株高、灌幅, 取各指标平均值作为标准株的衡量依据。根据试验需要挖取标准株的部分根系作为试验根。将根系置于与生长环境相似的湿沙中低温保存, 带回实验室后, 放在 4℃ 的冰箱中保存, 以保持根的鲜活性, 尽快完成试验。

1.2 试验方法

1.2.1 直段根的制备 每种植物按 0.5 mm 为一径级组进行分级, 不同径级分别取 30 根左右做重复试验。

第一作者简介:刘玥(1990-), 女, 内蒙古包头人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。

责任作者:刘静(1958-), 女, 博士, 教授, 研究方向为干旱及半干旱地区的水土保持与荒漠化防治。E-mail:ljing58@126.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51064021; 51364034)。

收稿日期:2014-05-20

试验根长度取 40 mm, 试验部分长 20 mm。每个试验根的试验部分两等分, 用游标卡尺对试验根上的标记点 (D_1 、 D_2 、 D_3) 进行直径的测量 (每隔 120° 测量 1 次), 取 3 次平均值作为该试验根的直径。

1.2.2 含侧根分支处根段的制备 每种植物根系选取侧根分支处直径 ≥ 0.2 mm, 具有一个侧根分支处且粗细较均匀的根作为试验根。试验根按 0.5 mm 为一径级组进行分级, 不同径级分别取 20 根左右做重复试验。试验根长度取 40 mm (按分支前根轴线的延长线量取), 试验部分 20 mm, 节点位于试验部分中间。用游标卡尺对试验根上的标记点 (D_1 、 D_2 、 D_3) 进行直径的测量 (每隔 120° 测量 1 次), 取其平均值作为该试验根的直径。

1.2.3 抗弯强度试验 采用悬臂梁试验模拟土体变形时根的一端固持在土体中, 固持端下面的根系随着土体

的错动而弯曲变形时, 根系抵抗弯曲的能力。

1.3 项目测定

试验采用 TY-8000 伺服式强力机以及自制的夹具。如图 1 所示, AD_1 段用夹具固定, 施力点位于 D_3 , $D_1 \sim D_3$ 段长为 20 mm。含节点根段夹持时使 2 条分支后的侧根处于水平状态。压头位于施力点上方, 与试验根垂直。当力达到峰值后仪器自动停止并且自动采集最大弯力值。试验根夹口处断裂的视为无效数据。抗弯强度由下列公式进行计算: $\sigma = M/W$, $M = F_1 L$, $W = \pi D^3 / 32$, 式中: M -最大弯矩 ($N \cdot mm$); W -抗弯截面模量 (mm^3); L -根长 (mm); D -根的直径 (mm)。

1.4 数据分析

试验数据采用 SAS 软件进行分析。

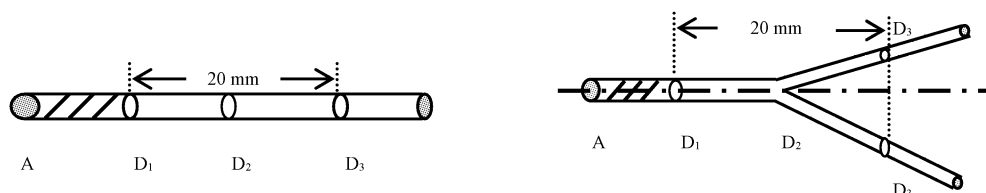


图 1 直段根和侧根分支处示意图

Fig. 1 The diagram of straight root and lateral root

2 结果与分析

2.1 2 种植物同径级直段根与侧根分支处抗弯力的差异

图 2 分别为柠条和沙棘同径级直段根与侧根分支处的抗弯力, 同径级直段根和侧根分支处抗弯力与直径的回归方程分别为: $F_{\text{柠条直}} = 0.0676D^{3.0059}$ ($R^2 = 0.9709$, $D = 0.91 \sim 6.08$ mm); $F_{\text{柠条侧}} = 0.0494D^{3.1196}$ ($R^2 = 0.9416$, $D = 1.14 \sim 4.85$ mm); $F_{\text{沙棘直}} = 0.0755D^{2.7538}$ ($R^2 = 0.9126$, $D = 0.88 \sim 6.07$ mm); $F_{\text{沙棘侧}} = 0.0881D^{2.4867}$ ($R^2 = 0.8625$, $D = 1.09 \sim 4.86$ mm)。

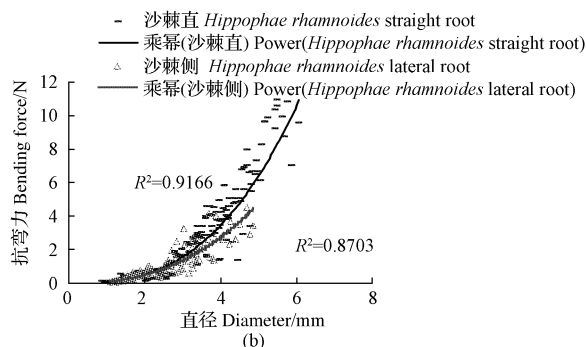
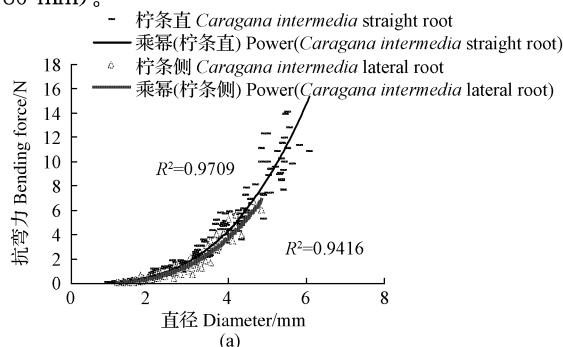
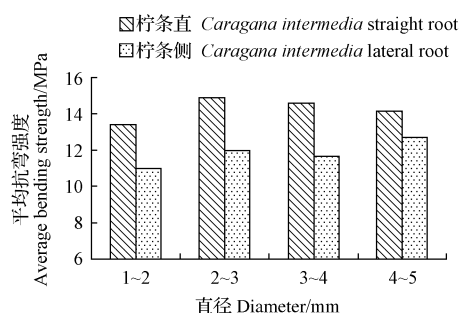


图 2 柠条、沙棘侧根分支处与直段根抗弯力的比较

Fig. 2 Comparison of bending force between straight root and lateral root about *Caragana intermedia* and *Hippophae rhamnoides*

棘>柠条,直径>2.5 mm时,抗弯力表现为柠条>沙棘。多数径级范围内,同种植物平均抗弯力的大小均表现为侧根分支处小于相同径级的直段根。

柠条、沙棘直段根直径分别从0.91 mm增大到6.08 mm、从0.88 mm增大到6.07 mm的过程中,抗弯力变化幅度分别为0.055~14.080 N和0.067~10.930 N;柠条、沙棘侧根分支处直径分别从1.14 mm增大到4.85 mm、从1.09 mm增大到4.86 mm的过程中,抗弯力变化幅度分别为0.071~6.72 N和0.067~4.53 N。2种植物随着根径的增大,抗弯力的增幅较大。直径在1~4 mm范围内,当根径为2~2.5 mm时,柠条和沙棘直段根抗弯力分别为0.85 N和0.46 N,侧根分支处抗弯力分别为0.69 N和0.79 N。当根径为2.5~3.0 mm时,柠条和沙棘直段根抗弯力分别为1.33 N和1.12 N,侧根分支处抗弯力分别为1.05 N和1.00 N。2种植物直段根抗弯力分别增加了56%和143%;侧根分支处抗弯力分别增加了52%和27%。柠条直段根抗弯力约为侧根分支处抗弯力的2.48倍,沙棘直段根抗弯力约为侧根分支处抗弯力的2.21倍。



2.2 2种植物同径级直段根与侧根分支处抗弯强度的差异

从图3可以看出,柠条同径级直段根和侧根分支处抗弯强度随直径的变化无明显规律,分别在均值上下波动。沙棘直段根抗弯强度随直径的变化规律不明显,在均值上下波动,而沙棘侧根分支处抗弯强度随直径的增加呈一定趋势的减小。由SAS软件对数据进行差异性检验可知,2种植物根系抗弯强度在 $\alpha=0.05$ 的显著水平下差异显著。由表1可知,同种植物平均抗弯强度表现为直段根大于侧根分支处。2种植物相同根型平均抗弯强度种间大小均表现为柠条>沙棘。柠条直段根抗弯强度约为沙棘直段根抗弯强度的1.12倍,柠条侧根分支处抗弯强度约为沙棘侧根分支处抗弯强度的1.04倍。为了进一步比较2种植物侧根分支处与直段根的差异性,分别将2种植物侧根分支处的平均抗弯强度与同径级直段根的平均抗弯强度进行商比,得出柠条侧根分支处抗弯强度约为直根段的83.1%,沙棘侧根分支处抗弯强度约为直根段的89.4%。

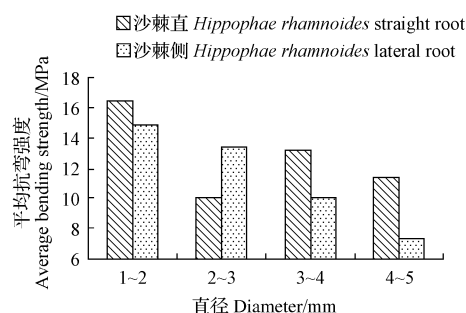


图3 柠条、沙棘侧根分支处与直段根抗弯强度的比较

Fig. 3 Comparison of bending strength between straight root and lateral root about *Caragana intermedia* and *Hippophae rhamnoides*

表1 2种植物直根段和侧根分支处平均抗弯强度

Table 1 The average bending strength between straight root and lateral root about two kinds of plants

植物名称 Plant name	径级范围 Class size range /mm	抗弯强度 Average bending strength/MPa
柠条(直) <i>Caragana intermedia</i> (Straight root)	0.91~6.08	14.26±1.31
柠条(侧) <i>Caragana intermedia</i> (Lateral root)	1.14~4.85	11.84±1.05
沙棘(直) <i>Hippophae rhamnoides</i> (Straight root)	0.88~6.07	12.76±1.24
沙棘(侧) <i>Hippophae rhamnoides</i> (Lateral root)	1.09~4.86	11.41±1.19

3 讨论与结论

柠条和沙棘单根的抗弯力均随直径的增大呈幂函数增加趋势,直径>2.5 mm时,相同径级下2种植物平均抗弯力的种间大小表现为柠条>沙棘。这与薛冬梅^[16]对柠条和沙棘枝条抗弯特性的研究得出的结果相

似,即2种植物枝条抗弯力与直径呈二次多项式增加的趋势,枝条直径在1.00~5.14 mm范围内,相同径级下2种植物枝条抗弯力种间大小均表现为柠条>沙棘。柠条和沙棘单根的抗弯力均小于各自相同径级时枝条的抗弯力,这表明与枝条相比植物根系的柔韧性较好。并且,将柠条和沙棘单根抗弯力与相同径级时的枝条抗弯力进行相关分析后得出,2种植物单根抗弯力与枝条抗弯力间相关系数均达到0.8以上。这说明植物地上与地下部分在力学特性方面有一定的相关性。

根据课题组已完成的试验可知^[15,17-18],柠条和沙棘单根的抗拉力均与直径呈正相关关系,抗拉强度与直径呈负相关关系。并且直段根抗拉力和抗拉强度普遍大于侧根分支处,并且是柠条>沙棘。通过对比该试验结果可知,柠条同径级直段根和侧根分支处平均抗弯强度均大于沙棘。当土体发生错动时,柠条有更好地抵抗弯

曲变形的能力,也就是说相比之下柠条可以更好地增强土体抗剪强度。

2种植物同径级直段根和侧根分支处的抗弯力与直径均呈幂函数正相关关系,而抗弯强度随直径变化无明显规律,在均值左右波动。多数径级范围同种植物间平均抗弯力和平均抗弯强度均表现为直根段大于同一径级侧根分支处。

相同径级下,当直段根和侧根分支处直径 $>2.5\text{ mm}$ 时,2种植物直段根和侧根分支处抗弯力和抗弯强度的种间比较均表现为柠条 $>$ 沙棘。

参考文献

- [1] 周云艳,陈建平,王晓梅.植物根系固土护坡机理的研究进展及展望[J].生态环境学报,2012(6):1171-1177.
- [2] Terwilliger V J, Waldron L J. Effects of root reinforcement on soil-slip patterns in the transverse ranges of southern California[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103: 775-785.
- [3] 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(4):895-904.
- [4] 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(5):21-25.
- [5] 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(1):87-91.
- [6] 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(3):114-118.
- [7] 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: 194-201.
- [8] Ali O. Shear strength of a soil containing vegetation roots[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(4): 587-596.
- [9] 陈昌富,刘怀星,李亚平.草根加筋土的室内三轴试验研究[J].岩土力学,2007(10):2041-2045.
- [10] 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.
- [11] 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(1):138-140.
- [12] Mattie C, Bischetti G B. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species[J]. Plant and Soil, 2005, 278: 23-32.
- [13] 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.
- [14] 朱清科,陈丽华,张东升,等.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.
- [15] 刘晓敏.5种植物侧根分支处抗拉力学特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
- [16] 薛冬梅.3种植物枝条生物力学特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [17] 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.
- [18] 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.

The Bending Mechanical Characteristics of Two Kinds of Plants' Straight Root and Lateral Root

LIU Yue¹, LIU Jing¹, ZHANG Ge², ZHANG Xin³, ZHAO Ying-ming²

(1. Institute of Ecological Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010010; 2. Experimental Center for Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia 015200; 3. Institute of Water Resources for Pasturing Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010010)

Abstract: With the 3—4 year-old *Caragana intermedia*, *Hippophae rhamnoides* as the research objects, the same diameter straight root and lateral root's bending mechanical characteristics through the cantilever beam test were studied. The results showed that, bending force of two plants' straight root and lateral root showed a positive power function relation to diameter. The bending strength had no law to diameter, fluctuating around the average. The same plant of average bending force and bending strength showed that straight root was greater than the same diameter lateral root during most diameter level range. At the same diameter, when straight root and lateral root's diameter $>2.5\text{ mm}$, the bending force and bending strength of the two plants compared: *Caragana intermedia* $>$ *Hippophae rhamnoides*. The bending strength about *Caragana intermedia* straight root was about 1.12 times of *Hippophae rhamnoides* straight root. The bending strength about *Caragana intermedia* lateral root was about 1.04 times of *Hippophae rhamnoides* lateral root.

Keywords: *Caragana intermedia*; *Hippophae rhamnoides*; bending force; bending strength; straight root; lateral root